

Estudo de reparações adesivas pela técnica de
remendo embebido com reforços exteriores para
aumento da resistência

Raul Domingos Ferreira Moreira

Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



15 de dezembro de 2013

Relatório da Unidade Curricular de Dissertação/Projecto/Estágio do 2º ano do Mestrado em
Engenharia Mecânica

Candidato: Raul Domingos Ferreira Moreira, Nº 1040827, 1040827@isep.ipp.pt

Orientação Científica: Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, RDS@isep.ipp.pt

Co Orientação Científica: Arnaldo Manuel Guedes Pinto, AGP@isep.ipp.pt

Mestrado em Engenharia Mecânica – Ramo Construções Mecânicas

Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



15 de dezembro de 2013

*Dedico este trabalho aos meus Pais, Irmão, à minha Iris, aos meus amigos e a todas as
pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho*

Agradecimentos

Agradeço a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho. No entanto, devo especial referência às seguintes individualidades e instituições.

Ao meu orientador o Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, ao meu co-orientador o Professor Doutor Arnaldo Manuel Guedes Pinto, pela oportunidade que me concederam e por todo o apoio que me prestaram ao longo da realização deste trabalho. Agradeço em particular pela preciosa ajuda que me forneceram na parte da simulação numérica, na realização dos ensaios experimentais e na revisão do texto.

Agradeço também aos meus colegas de curso, o Eng.º Hélio Carvalho e Eng.º Frederico Ferreira por toda a paciência e companhia durante a realização deste trabalho.

Ao Laboratório de Ensaios Mecânicos do ISEP por permitir a granalhagem dos provetes utilizados nos ensaios de tração.

Devo agradecimentos em especial ao Instituto Superior de Engenharia do Porto por me permitir realizar este trabalho e por todos os ensinamentos que me foram transmitidos ao longo dos anos.

Resumo

As ligações adesivas têm sido utilizadas em áreas como a indústria aeroespacial, aeronáutica, de defesa, automóvel, da construção civil e das madeiras. As juntas adesivas têm vindo a substituir métodos como a soldadura, e ligações parafusadas e rebitadas, devido à facilidade de fabricação, maiores cadências de produção, menores custos, facilidade em unir materiais diferentes, melhor resistência à fadiga, entre outras razões. Como tal, também se utilizam reparações adesivas para restituição da resistência de estruturas danificadas, cujas técnicas mais comuns são a sobreposição simples, sobreposição dupla e remendo embebido. As reparações por remendo embebido, que são as mais eficientes, consistem na realização de um furo cónico na zona danificada e colagem de um remendo com a forma complementar do furo, de tal forma que não é alterada a forma inicial do componente. Neste trabalho pretende-se estudar experimental e numericamente reparações adesivas por remendo embebido, nomeadamente o efeito da utilização de reforços exteriores (em um ou nos dois lados da estrutura), para diferentes ângulos de inclinação. Foi considerado um adesivo dúctil (Araldite® 2015) e outro frágil (Araldite® AV138), o que permitiu abranger processos de rotura bastante distintos. O estudo experimental é acompanhado por outro numérico no *software* ABAQUS®, usando modelos coesivos para a previsão numérica da resistência das reparações. O trabalho numérico permitiu o estudo das distribuições de tensões, o que possibilitou a análise detalhada dos resultados obtidos. Foi também realizado um estudo numérico de otimização das reparações por alteração da espessura dos reforços e utilização de chanfro nas extremidades dos mesmos. Nos resultados obtidos, constatou-se a adequabilidade do método numérico na previsão fiável da resistência, e também que a utilização dos reforços aumenta consideravelmente o rendimento das reparações (até 530 % e 340 % para os adesivos Araldite® 2015 e AV138, respetivamente), o que poderá justificar a sua utilização em aplicações industriais em que a perturbação aerodinâmica causada por esta alteração não seja relevante.

Palavras-Chave

Adesivo, remendo embebido, Método de Elementos Finitos, modelos de dano coesivos.

Abstract

Adhesive bonding has been used in diverse industries like aerospace, aeronautic, defense, automotive, construction and wood. Adhesive joints are gradually replacing traditional bonding methods such as welding and bolted or riveted joints, due to their easier manufacturing, higher production rates, lower costs, possibility to bond different materials, better fatigue resistance, among other advantages. Therefore, adhesive bonding is also used to repair damaged structures, by restoring their full functionality, and the more common repair techniques are single strap, double strap and scarf repairs. Scarf repairs, which are the more efficient ones, consist on the execution of a conic hole in the structure to remove the damaged material, and then to bond a patch with the complementary geometry of the hole, such that the initial geometry of the structure is not altered. This work aims to study experimentally and numerically scarf repairs, especially the effect of using one or two external reinforcement plates on strength (on one or both sides of the structure, respectively), for different scarf angles. A ductile (Araldite® 2015) and a brittle adhesive (Araldite® AV138), were considered which allowed to obtain distinct rupture processes. The experimental study was followed by a numerical study of the software ABAQUS®, using cohesive models to numerically predict the strength of the repairs. The numeric work also allowed the study of the stress distributions, which enabled a thorough analysis of the obtained results. A numerical study of the repairs optimization was also performed by changing the thickness of the reinforcement plates and using chamfers on the edges of the reinforcements. From the obtained results, it was found that the numerical method is reliable for the strength prediction, and also that the use of reinforcements increases the repairs efficiency (up to 530 % and 340 % for the adhesives Araldite® 2015 and AV138, respectively), which may justify its use in industrial applications where the aerodynamic disturbance caused by this change is not relevant.

Keywords

Adhesive, scarf, Finite Element Method, cohesive zone models.

Índice

| | |
|--|--------------|
| AGRADECIMENTOS | VII |
| RESUMO | IX |
| ABSTRACT | XI |
| ÍNDICE..... | XIII |
| ÍNDICE DE FIGURAS | XV |
| ÍNDICE DE TABELAS | XXIII |
| NOMENCLATURA | XXV |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO | 1 |
| 1.2. OBJETIVOS | 2 |
| 1.3. METODOLOGIA..... | 2 |
| 1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO | 3 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 5 |
| 2.1. INTRODUÇÃO | 6 |
| 2.2. JUNTAS ADESIVAS..... | 10 |
| 2.2.1. Vantagens e desvantagens das juntas adesivas | 12 |
| 2.2.2. Esforços e rotura em juntas adesivas | 15 |
| 2.2.3. Tipos de juntas adesivas | 17 |
| 2.3. TIPOS DE REPARAÇÕES ADESIVAS | 21 |
| 2.3.1. Descrição dos tipos de reparações mais comuns | 22 |
| 2.3.2. Reparções por remendo embebido | 26 |
| 2.3.2.1. Distribuição de tensões nas reparações | 27 |
| 2.3.2.2. Resistência das reparações | 30 |
| 2.3.2.3. Técnicas de aumento da resistência..... | 32 |
| 2.4. PREVISÃO DE RESISTÊNCIA EM LIGAÇÕES ADESIVAS | 34 |
| 2.4.1. Métodos analíticos | 35 |
| 2.4.2. Métodos numéricos..... | 35 |
| 3. TRABALHO EXPERIMENTAL..... | 39 |
| 3.1. MATERIAIS | 40 |
| 3.1.1. Substratos, remendos e reforços | 40 |
| 3.1.2. Adesivos..... | 41 |
| 3.2. REPARAÇÕES 2D..... | 43 |
| 3.2.1. Dimensões e geometria | 43 |

| | | |
|-------------------|--|------------|
| 3.2.2. | Preparação dos substratos, reforços e remendos | 45 |
| 3.2.3. | Fabrico dos provetes | 47 |
| 3.3. | CONDIÇÕES DE ENSAIO | 51 |
| 3.4. | RESULTADOS E COMENTÁRIOS DAS JUNTAS 2D | 51 |
| 3.4.1. | Modos de rotura | 52 |
| 3.4.2. | Curvas $P-\delta$ | 54 |
| 3.4.3. | Resistência das reparações | 55 |
| 4. | TRABALHO NUMÉRICO | 57 |
| 4.1. | CONDIÇÕES DE ANÁLISE NUMÉRICA | 58 |
| 4.2. | MODELOS DE DANO COESIVO | 61 |
| 4.2.1. | Modelo de dano triangular | 62 |
| 4.2.2. | Determinação das propriedades coesivas | 62 |
| 4.3. | ANÁLISE DE TENSÕES DAS JUNTAS 2D | 64 |
| 4.3.1. | Tensões de arrancamento | 65 |
| 4.3.2. | Tensões de corte | 76 |
| 4.4. | PREVISÃO DO COMPORTAMENTO DAS JUNTAS 2D | 86 |
| 4.4.1. | Modo de rotura | 86 |
| 4.4.2. | Curvas $P-\delta$ | 90 |
| 4.4.3. | Resistência das reparações | 93 |
| 4.5. | COMPARAÇÃO DO TRABALHO NUMÉRICO COM O EXPERIMENTAL | 96 |
| 4.6. | ALTERAÇÃO DA GEOMETRIA PARA MELHORIA DO DESEMPENHO DA REPARAÇÃO | 99 |
| 4.6.1. | Alteração da espessura dos reforços | 100 |
| 4.6.2. | Chanfro nas extremidades dos reforços | 113 |
| 5. | CONCLUSÕES | 123 |
| | REFERÊNCIAS | 129 |
| APÊNDICE 1 | MODOS DE ROTURA EXPERIMENTAIS | 137 |
| APÊNDICE 2 | CURVAS $P-\delta$ EXPERIMENTAIS | 139 |
| APÊNDICE 3 | RESULTADOS TENSÕES DE ARRANCAMENTO σ_y | 141 |
| APÊNDICE 4 | RESULTADOS TENSÕES DE CORTE τ_{xy} | 145 |
| APÊNDICE 5 | CURVAS $P-\delta$ NUMÉRICAS PARA REPARAÇÕES COM O ADESIVO ARLDITE® 2015 | 149 |
| APÊNDICE 6 | CURVAS $P-\delta$ NUMÉRICAS PARA REPARAÇÕES COM O ADESIVO ARLDITE® AV138 | 151 |
| APÊNDICE 7 | COMPARAÇÃO DO TRABALHO NUMÉRICO COM O EXPERIMENTAL | 153 |
| ANEXO A | FICHA TÉCNICA DA LIGA DE ALUMÍNIO AW6082 T651 | 155 |
| ANEXO B | FICHA TÉCNICA DO ADESIVO ARLDITE® 2015 | 157 |
| ANEXO C | FICHA TÉCNICA DO ADESIVO ARLDITE® AV138 | 163 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Aplicação de adesivo na fuselagem de madeira de um avião “Mosquito” em 1944 [4]..... | 7 |
| Figura 2 – Exemplo de aplicação de ligações adesivas em veículos [5]. | 7 |
| Figura 3 – Aspeto de ligação adesiva através da adesão e coesão [6]..... | 10 |
| Figura 4 – Partes constituintes do avião <i>Cessna Citation III</i> ligadas por adesivos [13]. | 11 |
| Figura 5 – Exemplo de utilização de adesivos nas sapatas de pilares (a) e (b) [14]. | 11 |
| Figura 6 – Exemplo de utilização de adesivos em componentes de máquinas [15]. | 12 |
| Figura 7 – Exemplo de utilização de adesivos em componentes de eletrónica [16]. | 12 |
| Figura 8 – Exemplos de utilização de adesivos em componentes de automóveis [15]. | 12 |
| Figura 9 – Exemplos de fabricação de ligações adesivas automatizadas (a) e (b) [17]. | 13 |
| Figura 10 – Distribuição da tensão numa junta rebitada (a) e numa junta colada (b) [3]..... | 14 |
| Figura 11 – Esquema representativo dos vários esforços de uma ligação adesiva [18]..... | 15 |
| Figura 12 – Representação esquemática dos modos de rotura em juntas adesivas de sobreposição simples [19]. | 17 |
| Figura 13 – Tipos de juntas mais comuns [3]. | 18 |
| Figura 14 – Influência do comprimento de sobreposição de adesivo na força de rotura para adesivos dúcteis e frágeis [1]..... | 21 |
| Figura 15 – Reparação na asa de um avião Lockheed Hercules C130, caso típico de dano provocado por impacto explosivo oriundo de fogo terrestre [28]..... | 22 |
| Figura 16 – Geometria da reparação SS em 3D. | 22 |
| Figura 17 – Geometria da técnica de reparação SS em 2D [29]. | 23 |
| Figura 18 – Geometria da reparação SS em 2D dividida pelo seu eixo de simetria [30 e 31]. | 23 |
| Figura 19 – Configurações deformadas de reparações SS [44]. | 23 |
| Figura 20 – Geometria da reparação SD em 3D. | 24 |
| Figura 21 – Geometria da reparação SD em 2D [29]. | 24 |
| Figura 22 – Geometria da reparação SD em 2D dividida pelo seu eixo de simetria [30 e 31]..... | 24 |
| Figura 23 – Configurações deformadas de reparações SD [44]. | 25 |
| Figura 24 – Geometria da técnica de reparação por remendo embebido em 3D. | 25 |
| Figura 25 – Geometria da reparação por remendo embebido em 2D [29]..... | 26 |
| Figura 26 – Geometria da técnica de reparação por remendo embebido em 2D, de meia reparação dividida pelo seu eixo de simetria [30 e 31]. | 26 |
| Figura 27 – Variação do valor da tensão de arrancamento normalizada, σ_n/τ_{avg} , ao longo da linha média da camada de adesivo para diferentes valores de α [56]. | 27 |
| Figura 28 – Variação do valor da tensão de corte normalizada, τ_{xy}/τ_{avg} , ao longo da linha média da camada de adesivo para diferentes valores de α [56]. | 28 |

| | |
|---|----|
| Figura 29 – Influência da variação de α nas tensões normalizadas de arrancamento, σ_y/σ_0 , e de corte τ_{xy}/σ_0 ao longo da camada de adesivo em que se aplica uma tensão média σ_0 nos aderentes [59]. | 29 |
| Figura 30 – Tensão de arrancamento normalizada ao longo da camada de adesivo para uma reparação por remendo embebido e para reparação por SS [70]. | 30 |
| Figura 31 – Tensão de corte normalizada ao longo da camada de adesivo para uma reparação por remendo embebido e para reparação por SS [70]. | 30 |
| Figura 32 – Curva P - δ numérica para diferentes valores de α [68]. | 31 |
| Figura 33 – Comparação de P_m em função de α entre trabalho numérico e experimental [69]. | 31 |
| Figura 34 – Alteração da geometria da reparação por remendo embebido através da variação de α ao longo da linha do adesivo [71]. | 32 |
| Figura 35 – Idealização da geometria de reparação por remendo embebido com reforços aplicados em cada uma das faces da reparação [68]. | 33 |
| Figura 36 – η em função de α para reparações apenas com reforço exterior (a) e para reparações com reforços em ambas as faces da zona reparada (b) [68]. | 33 |
| Figura 37 – Curva (σ - ε) da liga de alumínio AW6082 T651 e respetiva aproximação numérica para análise através dos elementos finitos [94]. | 40 |
| Figura 38 – Curvas σ - ε para os adesivos Araldite® AV138 (a) e Araldite® 2015 (b) [94]. | 42 |
| Figura 39 – Configuração da reparação com reforço exterior (condição 1). | 43 |
| Figura 40 – Configuração da reparação com reforço exterior e interior (condição 2). | 44 |
| Figura 41 – Forno da Nabertherm. | 45 |
| Figura 42 – Fresadora “Gambin” (a), processo de fresagem das rampas (b). | 46 |
| Figura 43 – Guilhotina da “Adira”. | 46 |
| Figura 44 – Granalhadora “Cidblast”. | 47 |
| Figura 45 – Aspeto final dos substratos e remendo após tratamento da superfície. | 47 |
| Figura 46 – Colocação dos substratos nas régua de madeira (a), e aplicação de fio de pesca para garantir $t_A=0,2$ mm (b). | 48 |
| Figura 47 – Aplicação de molas para exercer pressão sobre os remendos. | 48 |
| Figura 48 – Furadora “FFI Máquinas” utilizado para a remoção de excedente de adesivo (a), e aspeto final da reparação após remoção do excedente de adesivo e sem a aplicação de reforços (b). | 49 |
| Figura 49 – Fixação dos provetes nas régua de madeira (a), e aplicação dos fios de pesca para garantir um t_A de 0,2 mm (b). | 49 |
| Figura 50 – Aplicação do adesivo para colagem dos reforços (a) e aplicação dos reforços (b). | 50 |
| Figura 51 – Reparação com a aplicação em simultâneo de reforço exterior e interior. | 50 |
| Figura 52 – Máquina de ensaio de tração Shimadzu – Autograph AG-X (a) e provete a ser ensaiado (b). | 51 |
| Figura 53 – Provetes de $\alpha=10^\circ$ condição 1 (a), e condição 2 (b), após a realização do ensaio de tração. | 52 |
| Figura 54 – Vista de perfil de provetes de $\alpha=10^\circ$ condição 1 (a), e condição 2 (b), após a realização do ensaio de tração. | 52 |
| Figura 55 – Provetes de $\alpha=45^\circ$ condição 1 (a) e condição 2 (b), após a realização do ensaio de tração. | 53 |

| | |
|---|----|
| Figura 56 – Vista de perfil de provetes de $\alpha=45^\circ$ condição 1 (a), e condição 2 (b), após a realização do ensaio de tração. | 53 |
| Figura 57 – Curvas $P-\delta$ experimentais para $\alpha=10^\circ$ condição 1 (a), e condição 2 (b). | 54 |
| Figura 58 – Curvas $P-\delta$ experimentais para $\alpha=45^\circ$ condição 1 (a), e condição 2 (b). | 54 |
| Figura 59 – Gráfico de $P_{m\acute{a}x}$ e desvio padrão por cada α em análise..... | 55 |
| Figura 60 – Esquema com as dimensões 2D só com reforço exterior utilizado no trabalho numérico. | 58 |
| Figura 61 – Esquema com as dimensões 2D com reforço exterior e interior utilizado no trabalho numérico. ... | 58 |
| Figura 62 – Exemplo dos elementos do MEF utilizados para modelação das reparações. | 59 |
| Figura 63 – Exemplo da malha da reparação com $\alpha=45^\circ$, $c=5$ mm e reforço exterior..... | 59 |
| Figura 64 – Exemplo da malha da reparação com $\alpha=45^\circ$, $c=5$ mm e reforço exterior e interior..... | 59 |
| Figura 65 – Pormenor da descontinuidade para $\alpha=45^\circ$ | 60 |
| Figura 66 – Pormenor da descontinuidade para $\alpha=10^\circ$ | 60 |
| Figura 67 – Lei de tração-separação triangular disponível no ABAQUS® [103]..... | 61 |
| Figura 68 – utilização de 12 elementos sólidos para modelação do adesivo na direção da espessura. | 65 |
| Figura 69 – Identificação da camada de adesivo do remendo para a obtenção dos valores da tensão de arrancamento. | 66 |
| Figura 70 – Tensão de arrancamento σ_y , para a camada de adesivo do remendo, com $\alpha=10^\circ$ para as diferentes configurações..... | 66 |
| Figura 71 – Tensão de arrancamento σ_y , para a zona do remendo com $\alpha=10^\circ$ na extremidade próxima do eixo de simetria (a) e na extremidade afastada do eixo de simetria (b)..... | 67 |
| Figura 72 – Tensão de arrancamento σ_y , para a camada de adesivo do remendo, com $\alpha=45^\circ$ para as diferentes configurações..... | 67 |
| Figura 73 – Tensão de arrancamento σ_y , para a zona do remendo com $\alpha=45^\circ$ | 68 |
| Figura 74 – Identificação da camada de adesivo do reforço exterior para a obtenção dos valores da tensão de arrancamento. | 69 |
| Figura 75 – Tensão de arrancamento σ_y , para a camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=10^\circ$ para as diferentes configurações. | 69 |
| Figura 76 – Tensão de arrancamento σ_y , para a camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=10^\circ$ e $c=5$ mm para a extremidade próxima do eixo de simetria (a) e para a extremidade afastada do eixo de simetria (b). | 70 |
| Figura 77 – Tensão de arrancamento σ_y , para a camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=10^\circ$ e $c=10$ mm, para a extremidade próxima do eixo de simetria (a) e para a extremidade afastada do eixo de simetria (b). | 70 |
| Figura 78 – Tensão de arrancamento σ_y , para a camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=45^\circ$ para as diferentes configurações. | 71 |
| Figura 79 – Tensão de arrancamento σ_y , para a camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=45^\circ$ e $c=5$ mm. | 72 |
| Figura 80 – Tensão de arrancamento σ_y , para a camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=45^\circ$ e $c=10$ mm. | 72 |
| Figura 81 – Identificação da camada de adesivo do reforço interior para a obtenção dos valores da tensão de arrancamento. | 72 |

| | |
|--|----|
| Figura 82 – Tensão de arrancamento σ_y , para a camada de adesivo do reforço interior, com $\alpha=10^\circ$ para as diferentes configurações..... | 73 |
| Figura 83 – Tensão de arrancamento σ_y , para a camada de adesivo do reforço exterior e interior, com $\alpha=10^\circ$ e $c=5$ mm para a extremidade próxima do eixo de simetria (a) e para a extremidade afastada do eixo de simetria (b)..... | 74 |
| Figura 84 – Tensão de arrancamento σ_y , para a camada de adesivo do reforço exterior e interior, com $\alpha=10^\circ$ e $c=10$ mm para a extremidade próxima do eixo de simetria (a) e para a extremidade afastada do eixo de simetria (b)..... | 74 |
| Figura 85 – Tensão de arrancamento σ_y , para a camada de adesivo do reforço interior, com $\alpha=45^\circ$ para as diferentes configurações..... | 75 |
| Figura 86 – Tensão de arrancamento σ_y , para a camada de adesivo do reforço exterior e interior, com $\alpha=45^\circ$ e $c=5$ mm. | 75 |
| Figura 87 – Tensão de arrancamento σ_y , para a camada de adesivo do reforço exterior e interior, com $\alpha=45^\circ$ e $c=10$ mm. | 76 |
| Figura 88 – Tensão de corte τ_{xy} , para a camada de adesivo do remendo, com $\alpha=10^\circ$ para as diferentes configurações. | 77 |
| Figura 89 – Tensão de corte τ_{xy} , para a zona do remendo com $\alpha=10^\circ$ na extremidade próxima do eixo de simetria (a) e na extremidade afastada do eixo de simetria (b). | 77 |
| Figura 90 – Tensão de corte τ_{xy} , para a camada de adesivo do remendo, com $\alpha=45^\circ$ para as diferentes configurações. | 78 |
| Figura 91 – Tensão de corte τ_{xy} , para a zona do remendo, com $\alpha=45^\circ$ | 79 |
| Figura 92 – Tensão de corte τ_{xy} , para a camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=10^\circ$ para as diferentes configurações. | 80 |
| Figura 93 – Tensão de corte τ_{xy} , para a camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=10^\circ$ e $c=5$ mm para a extremidade próxima do eixo de simetria (a) e para a extremidade afastada do eixo de simetria (b). | 80 |
| Figura 94 – Tensão de corte τ_{xy} , para a camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=10^\circ$ e $c=10$ mm para a extremidade próxima do eixo de simetria (a) e para a extremidade afastada do eixo de simetria (b). | 81 |
| Figura 95 – Tensão de corte τ_{xy} , para a camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=45^\circ$ para as diferentes configurações. | 82 |
| Figura 96 – Tensão de corte τ_{xy} , para a camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=45^\circ$ e $c=5$ mm. | 82 |
| Figura 97 – Tensão de corte τ_{xy} , para a camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=45^\circ$ e $c=10$ mm. | 82 |
| Figura 98 – Tensão de corte τ_{xy} , para a camada de adesivo do reforço interior, com $\alpha=10^\circ$ para as diferentes configurações. | 83 |
| Figura 99 – Tensão de corte τ_{xy} , para a camada de adesivo do reforço exterior e interior, com $\alpha=10^\circ$ e $c=5$ mm, para a extremidade próxima do eixo de simetria (a) e para a extremidade afastada do eixo de simetria (b). | 84 |
| Figura 100 – Tensão de corte τ_{xy} , para a camada de adesivo do reforço exterior e interior, com $\alpha=10^\circ$ e $c=10$ mm, para a extremidade próxima do eixo de simetria (a) e para a extremidade afastada do eixo de simetria (b)..... | 84 |

| | |
|--|-----|
| Figura 101 – Tensão de corte τ_{xy} , para a camada de adesivo do reforço interior, com $\alpha=45^\circ$ para as diferentes configurações..... | 85 |
| Figura 102 – Tensão de corte τ_{xy} , para a camada de adesivo do reforço exterior e interior, com $\alpha=45^\circ$ e $c=5$ mm. | 85 |
| Figura 103 – Tensão de corte τ_{xy} para a camada de adesivo do reforço exterior e interior, com $\alpha=45^\circ$ e $c=10$ mm. | 86 |
| Figura 104 – Reparação com $\alpha=10^\circ$, $c=5$ mm e reforço exterior e interior (Araldite® 2015)..... | 88 |
| Figura 105 – Reparação com $\alpha=45^\circ$, $c=10$ mm e só com reforço exterior (Araldite® 2015). | 89 |
| Figura 106 – Reparação com $\alpha=10^\circ$, $c=5$ mm e só com reforço exterior (Araldite® AV138)..... | 89 |
| Figura 107 – Reparação com $\alpha=45^\circ$, $c=10$ mm e com reforço exterior e interior (Araldite® AV138). | 89 |
| Figura 108 – Curvas $P-\delta$ numéricas para $\alpha=10^\circ$ e adesivo Araldite® 2015. | 90 |
| Figura 109 – Curva $P-\delta$ numérica para $\alpha=45^\circ$ e adesivo Araldite® 2015. | 91 |
| Figura 110 – Curva $P-\delta$ numérica para $\alpha=10^\circ$ e adesivo Araldite® AV138..... | 92 |
| Figura 111 – Curva $P-\delta$ numérica para $\alpha=45^\circ$ e adesivo Araldite® AV138..... | 92 |
| Figura 112 – Comparação de $P_{m\acute{a}x}$ (a) e de η (b) para o adesivo Araldite® 2015. | 93 |
| Figura 113 – Comparação de $P_{m\acute{a}x}$ (a) e de η (b) para o adesivo Araldite® AV138..... | 94 |
| Figura 114 – Curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas para $\alpha=10^\circ$, $c=5$ mm e reforço exterior (a) e com reforço exterior e interior (b)..... | 96 |
| Figura 115 – Curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas para $\alpha=45^\circ$, $c=5$ mm e reforço exterior (a) e com reforço exterior e interior (b)..... | 97 |
| Figura 116 – Comparação dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ da análise numérica com as médias dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ da análise experimental e respetivos desvios padrão. | 98 |
| Figura 117 – Pormenor malha do chanfro de 15° aplicado na extremidade dos reforços..... | 100 |
| Figura 118 – Tensão de arrancamento σ_y , com $\alpha=10^\circ$ para as diferentes configurações e variação de espessura dos reforços, da camada de adesivo do remendo (a), do reforço exterior (b) e do reforço interior (c). ... | 101 |
| Figura 119 – Tensão de arrancamento σ_y , com $\alpha=45^\circ$ para as diferentes configurações e variações de espessura dos reforços, da camada de adesivo do remendo (a), do reforço exterior (b) e do reforço interior (c). ... | 102 |
| Figura 120 – Tensão de corte τ_{xy} , com $\alpha=10^\circ$ para as diferentes configurações e variações da espessura dos reforços, da camada de adesivo do remendo (a), do reforço exterior (b) e do reforço interior (c). | 104 |
| Figura 121 – Tensão de corte τ_{xy} , com $\alpha=45^\circ$ para as diferentes configurações e variações da espessura dos reforços, da camada de adesivo do remendo (a), do reforço exterior 8b) e do reforço interior (c). | 105 |
| Figura 122 – Curvas $P-\delta$ numéricas com variação de espessura dos reforços para $\alpha=10^\circ$ e adesivo Araldite® 2015 apenas com reforço exterior (a) e com reforço exterior e interior (b). | 107 |
| Figura 123 – Curvas $P-\delta$ numéricas com variação de espessura dos reforços para $\alpha=45^\circ$ e adesivo Araldite® 2015 apenas com reforço exterior (a) e com reforço exterior e interior (b). | 108 |
| Figura 124 – Comparação de $P_{m\acute{a}x}$ (a) e de η (b) para o adesivo Araldite® 2015, apenas com reforço exterior e variação da espessura dos reforços. | 108 |
| Figura 125 – Comparação de $P_{m\acute{a}x}$ (a) e de η (b) para o adesivo Araldite® 2015, com reforço exterior e interior e variação da espessura dos reforços. | 109 |

| | |
|--|-----|
| Figura 126 – Curvas $P-\delta$ numéricas com variação de espessura dos reforços para $\alpha=10^\circ$ e adesivo Araldite® AV138 apenas com reforço exterior (a), e com reforço exterior e interior (b). | 110 |
| Figura 127 – Curvas $P-\delta$ numéricas com variação de espessura dos reforços para $\alpha=45^\circ$ e adesivo Araldite® AV138 apenas com reforço exterior (a) e com reforço exterior e interior (b). | 111 |
| Figura 128 – Comparação de $P_{m\acute{a}x}$ (a), e de η (b), para o adesivo Araldite® AV138, apenas com reforço exterior e variação de espessura dos reforços. | 112 |
| Figura 129 – Comparação de $P_{m\acute{a}x}$ (a), e de η (b), para o adesivo Araldite® AV138, com reforço exterior e interior e variação de espessura dos reforços. | 112 |
| Figura 130 – Tensão de arrancamento σ_y , com $\alpha=10^\circ$ para as diferentes configurações e um chanfro nas extremidades dos reforços, da camada de adesivo do remendo (a), do reforço exterior (b) e do reforço interior (c). | 114 |
| Figura 131 – Tensão de arrancamento σ_y , com $\alpha=45^\circ$ para as diferentes configurações e um chanfro na extremidade dos reforços, da camada de adesivo do remendo (a), do reforço exterior (b) e do reforço interior (c). | 115 |
| Figura 132 – Tensão de corte τ_{xy} , com $\alpha=10^\circ$ para as diferentes configurações e um chanfro na extremidade dos reforços, da camada de adesivo do remendo (a), do reforço exterior (b) e do reforço interior (c). | 116 |
| Figura 133 – Tensão de corte τ_{xy} , com $\alpha=45^\circ$ para as diferentes configurações e um chanfro na extremidade dos reforços, da camada de adesivo do remendo (a), do reforço exterior (b) e do reforço interior (c). | 117 |
| Figura 134 – Curvas $P-\delta$ numéricas para adesivo Araldite® 2015 com chanfro na extremidade com $\alpha=10^\circ$ (a) e com $\alpha=45^\circ$ (b)..... | 118 |
| Figura 135 – Comparação de $P_{m\acute{a}x}$ (a) e de η (b) para o adesivo Araldite® 2015 com um chanfro efetuado na extremidade do reforço. | 119 |
| Figura 136 – Curvas $P-\delta$ numéricas para adesivo Araldite® AV138 com chanfro na extremidade com $\alpha=10^\circ$ (a) e com $\alpha=45^\circ$ (b)..... | 119 |
| Figura 137 – Comparação de $P_{m\acute{a}x}$ (a) e de η (b), para o adesivo Araldite® AV138 com um chanfro efetuado na extremidade do reforço. | 120 |
| Figura 138 – Provetes de $\alpha=15^\circ$ condição 1 (a), e condição 2 (b), após a realização do ensaio de tração. | 137 |
| Figura 139 – Vista de perfil de provetes de $\alpha=15^\circ$ condição 1 (a), e condição 2 (b), após a realização do ensaio de tração. | 137 |
| Figura 140 – Provetes de $\alpha=20^\circ$ condição 1 (a), e condição 2 (b), após a realização do ensaio de tração. | 137 |
| Figura 141 – Vista de perfil de provetes de $\alpha=20^\circ$ condição 1 (a), e condição 2 (b), após a realização do ensaio de tração. | 138 |
| Figura 142 – Provetes de $\alpha=30^\circ$ condição 1 (a), e condição 2 (b), após a realização do ensaio de tração. | 138 |
| Figura 143 – Vista de perfil de provetes de $\alpha=30^\circ$ condição 1 (a), e condição 2 (b), após a realização do ensaio de tração. | 138 |
| Figura 144 – Curvas $P-\delta$ experimentais para $\alpha=15^\circ$ condição 1 (a), e condição 2 (b). | 139 |
| Figura 145 – Curvas $P-\delta$ experimentais para $\alpha=20^\circ$ condição 1 (a), e condição 2 (b). | 139 |
| Figura 146 – Curvas $P-\delta$ experimentais para $\alpha=30^\circ$ condição 1 (a), e condição 2 (b). | 139 |
| Figura 147 – Tensão de arrancamento σ_y , com $\alpha=15^\circ$ para as diferentes configurações de reparação da camada de adesivo do remendo (a), do reforço exterior (b) e do reforço interior (c). | 141 |

| | |
|--|-----|
| Figura 148 – Tensão de arrancamento σ_y , com $\alpha=20^\circ$ para as diferentes configurações de reparação da camada de adesivo do remendo (a), do reforço exterior (b) e do reforço interior (c). | 142 |
| Figura 149 – Tensão de arrancamento σ_y , com $\alpha=30^\circ$ para as diferentes configurações de reparação da camada de adesivo do remendo (a), do reforço exterior (b) e do reforço interior (c). | 143 |
| Figura 150 – Tensão de corte τ_{xy} , com $\alpha=15^\circ$ para as diferentes configurações de reparação da camada de adesivo do remendo (a), do reforço exterior (b) e do reforço interior (c). | 145 |
| Figura 151 – Tensão de corte τ_{xy} , com $\alpha=20^\circ$ para as diferentes configurações de reparação da camada de adesivo do remendo (a), do reforço exterior (b) e do reforço interior (c). | 146 |
| Figura 152 – Tensão de corte τ_{xy} , com $\alpha=30^\circ$ para as diferentes configurações de reparação da camada de adesivo do remendo (a), do reforço exterior (b) e do reforço interior (c). | 147 |
| Figura 153 – Curva $P-\delta$ numérica para $\alpha=15^\circ$ e adesivo Araldite® 2015. | 149 |
| Figura 154 – Curva $P-\delta$ numérica para $\alpha=20^\circ$ e adesivo Araldite® 2015. | 149 |
| Figura 155 – Curva $P-\delta$ numérica para $\alpha=30^\circ$ e adesivo Araldite® 2015. | 149 |
| Figura 156 – Curva $P-\delta$ numérica para $\alpha=15^\circ$ e adesivo Araldite® AV138. | 151 |
| Figura 157 – Curva $P-\delta$ numérica para $\alpha=20^\circ$ e adesivo Araldite® AV138. | 151 |
| Figura 158 – Curva $P-\delta$ numérica para $\alpha=30^\circ$ e adesivo Araldite® AV138. | 151 |
| Figura 159 – Curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas para $\alpha=15^\circ$, $c=5$ mm e reforço exterior (a) e com reforço exterior e interior (b). | 153 |
| Figura 160 – Curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas para $\alpha=20^\circ$, $c=5$ mm e reforço exterior (a) e com reforço exterior e interior (b). | 153 |
| Figura 161 – Curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas para $\alpha=30^\circ$, $c=5$ mm e reforço exterior (a) e com reforço exterior e interior (b). | 154 |
| Figura 162 – Composição química da série 6000 das ligas standard da Lanema. | 155 |
| Figura 163 – Equivalências Internacionais da série 6000 das ligas de alumínio da Lanema. | 155 |
| Figura 164 – Propriedades mecânicas típicas da série 6000 das ligas de alumínio da Lanema. | 156 |

Índice de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Classificação dos adesivos segundo o seu desempenho [7]. | 9 |
| Tabela 2 – Propriedades dos adesivos estruturais [11]. | 10 |
| Tabela 3 – Propriedades Mecânicas da Liga AW6082 T651. | 41 |
| Tabela 4 – Propriedades mecânicas dos adesivos Araldite® 2015 e Araldite® AV138 [94]. | 42 |
| Tabela 5 – Dimensões e geometria dos provetes. | 44 |
| Tabela 6 – Comprimento de reforço de acordo com o ângulo α do remendo. | 44 |
| Tabela 7 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ e rendimento da reparação por configuração e por α . | 56 |
| Tabela 8 – Número de elementos coesivos na camada de adesivo do remendo para cada α . | 60 |
| Tabela 9 – Parâmetros coesivos em tração e corte puros para uma camada de adesivo Araldite® 2015 com uma espessura de 0,2 mm. | 63 |
| Tabela 10 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com uma espessura de 0,2 mm. | 64 |
| Tabela 11 – Modos de rotura do para reparações com os adesivos Araldite® 2015 e AV138. | 87 |
| Tabela 12 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ e η para cada configuração. | 95 |
| Tabela 13 – Comparação em % da diferença entre os resultados obtidos pela análise numérica com os resultados obtidos pela análise experimental. | 99 |

Nomenclatura

Carateres Romanos

a – Comprimento do provete

b – Largura do substrato

c e e – Comprimento de sobreposição do reforço exterior

d – Comprimento do remendo na secção interior da reparação

E – Módulo de Young

G – Módulo de Corte

G_n – Taxa de libertação de energia de deformação em tração

G_s – Taxa de libertação de energia de deformação em corte

G_n^c – Tenacidade à tração

G_s^c – Tenacidade ao corte

L_t – Comprimento da camada de adesivo da reparação na direção tangencial ao remendo

K – Matriz Constitutiva

P – Força

$P_{\text{máx}}$ e P_m – Força máxima

t – Eixo local de coordenadas tangenciais

t_A – Espessura da camada de adesivo do remendo

t_B – Espessura da camada de adesivo do reforço

t_n^0 – Resistência máxima em tração

t_p – Espessura dos substratos

t_q – Espessura dos reforços

t_s^0 – Resistência máxima em corte

x – Eixo das abcissas

y – Eixo das ordenadas

Caracteres Gregos

α – Angulo do remendo

δ – Deslocamento

Δ – Desfasamento do deslocamento

ε – Deformação

ε_f – Deformação de rotura

γ_f – Deformação de rotura ao corte

η - Aumento percentual da resistência da reparação

σ – Tensão

σ_{ced} – Tensão de cedência

σ_f – Tensão de rotura

σ_n e σ_y – Tensão de arrancamento

τ_{avg} – Tensão de corte média

τ_{ced} – Tensão de cedência ao corte

τ_f – Tensão de rotura ao corte

τ_{xy} – Tensão de corte

ν – Coeficiente de Poisson

Abreviaturas

CFRP – *Carbon fiber reinforced polymer*

DCB – *Double cantilever beam*

EF – Elementos finitos

ENF – *End-notched flexure*

EPD – Estado plano de deformação

ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto

MDC – Modelo do dano coesivo

MEF – Método de elementos finitos

MEFX – Método de elementos finitos extendido

MFLE – Mecânica da fratura linear elástica

SD – Reparações por sobreposição dupla

SS – Reparações por sobreposição simples

TAST – *Thick adherend shear test*

TFVF – Técnica do fecho virtual de fenda

1. Introdução

No primeiro capítulo começa-se por enquadrar e definir os objetivos, e também por expor uma breve introdução a este trabalho, sendo mencionadas nos capítulos seguintes explicações mais aprofundadas sobre cada uma das temáticas abordadas na realização do trabalho.

1.1. Contextualização

As ligações adesivas estruturais encontram-se numa das áreas de grande importância para diversos sectores de indústria, como por exemplo a aeronáutica, aeroespacial, automóvel, entre outras. De facto, com o uso de ligações adesivas é possível unir materiais diferentes, algo que outrora não seria possível. Também permite evitar o uso de ligações aparafusadas e rebitadas, o que origina uma grande redução do peso das estruturas e também reduz as concentrações de tensões.

Com a vasta aplicação dos adesivos e com a utilização de diversas técnicas tornou-se também possível efectuar reparações em estruturas e garantir que essas mesmas estruturas adquiram novamente as propriedades mecânicas e estruturais iniciais, evitando assim que toda a estrutura fique comprometida a nível estrutural e que tenha de ser substituída por

uma nova ou por componentes novos. Deste modo existe um maior aproveitamento dos recursos existentes e também evitam-se gastos excessivos com manutenção ou substituição de muitos componentes.

1.2. Objetivos

A dissertação apresentada foi realizada, durante o ano letivo de 2012/2013 no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica ramo de Construções Mecânicas, ministrado no Instituto Superior de Engenharia do Porto. O trabalho apresentado tem como principal objetivo, o estudo numérico e experimental, de reparações por remendo embebido com diferentes ângulos de inclinação do remendo, nomeadamente no que diz respeito ao uso de placas externas de reforço (em um ou nos dois lados da estrutura), coladas posteriormente à execução da reparação.

1.3. Metodologia

O estudo principal, que será realizado tanto numericamente como experimentalmente, recorre ao uso de apenas um tipo de adesivo, o Araldite® 2015 com características dúcteis. As reparações por remendo embebido que foram estudadas têm as seguintes configurações: ângulos de inclinação de 10°, 15°, 20°, 30° e 45°, com um comprimento de sobreposição das placas externas de reforço de 5 mm, (em um ou nos dois lados da estrutura) e espessura de 1 mm. Após validação da técnica numérica adotada neste trabalho, foi realizado um estudo utilizando o *software* ABAQUS® e modelos coesivos de propagação de dano para a previsão numérica da resistência das juntas. Neste estudo as configurações de remendo embebido utilizadas são iguais às anteriores, mas recorrendo-se ao uso de dois comprimentos de sobreposição diferentes, das placas externas de reforço, de 5 mm e 10 mm, em um ou nos dois lados da estrutura respetivamente. Foram ainda realizados mais dois estudos numéricos, com as condições a seguir apresentadas. Configurações de junta de remendo embebido, de 10° e 45°, comprimento de sobreposição das placas externas de reforço de 5 mm (em um ou nos dois lados da estrutura), e utilizou-se as propriedades dos dois adesivos o Araldite® 2015 e o Araldite® AV138. Uma das variáveis é a espessura das placas externas de reforço que foram as seguintes: 0,5 mm, 1 mm e 2 mm. Também se estudou a utilização de chanfros nas extremidades nas placas externas de reforço, para minimização da

perturbação aerodinâmica. Com a utilização de reforços exteriores pretende-se reduzir os picos de tensão nas extremidades da camada de adesivo do remendo e criação de caminhos alternativos de transferência de esforços.

1.4. Organização do relatório

No primeiro capítulo descrevem-se os objetivos propostos e realiza-se uma pequena abordagem introdutória a este trabalho, identificando quais os estudos realizados.

No segundo capítulo realiza-se a revisão bibliográfica, na qual se explicam todas as temáticas abordadas. São enunciadas vantagens e desvantagens das juntas adesivas, esforços e modos de rotura, os tipos de juntas adesivas mais utilizadas e também são detalhados os tipos de reparação mais comuns, em particular as reparações por remendo embebido (*scarf*), que são as juntas estudadas nesta dissertação. São também descritas as distribuições de tensões, a resistência e as técnicas de aumento da resistência mais comuns das reparações de remendo embebido. Apresentam-se ainda neste capítulo os métodos de previsão de resistência em ligações adesivas e reparações.

No terceiro capítulo é apresentado o trabalho experimental, onde são enunciados os materiais utilizados e as suas propriedades, as dimensões e geometrias das reparações 2D, os métodos utilizados para a fabricação das juntas, as condições nas quais as juntas foram testadas e apresentam-se os resultados obtidos.

No quarto capítulo, destinado ao trabalho numérico, são expressas as condições da análise numérica, o modelo de dano coesivo utilizado, a análise de tensões de juntas 2D, a previsão do comportamento das reparações e validação da técnica numérica.

Reserva-se para o quinto e último capítulo, a apresentação dos resultados e das conclusões finais, bem como proposta de futuros trabalhos.

2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo, realiza-se uma introdução às ligações e reparações adesivas, abordando um pouco da sua história e da sua evolução até aos dias de hoje. São apresentadas vantagens e desvantagens, quais os principais esforços a que as juntas e reparações estão sujeitas e os modos de rotura mais comuns. Também se apresentam os principais tipos de adesivos e as suas aplicações, as configurações de reparação e os tipos de ligações mais utilizadas, sendo focados com mais detalhe as reparações por remendo embebido (*scarf*), por serem o tipo de junta estudada neste trabalho. Neste capítulo são ainda descritas as distribuições de tensões e a resistência das reparações por remendo embebido, bem como as técnicas de aumento da resistência das reparações. Para terminar são também descritos os métodos analíticos e numéricos mais utilizados para previsão de resistência em ligações adesivas.

2.1. Introdução

Os primeiros indícios da utilização de ligações adesivas remontam a milhares de anos atrás. Caçadores primitivos parecem ter melhorado a sua pontaria através da colagem, com cera de abelhas, de penas às suas flechas. Gravuras presentes na antiga cidade egípcia de Tebas, cerca de 1300 antes de Jesus Cristo, ilustram a utilização de um pote de cola e um pincel que foram utilizados para envernizar uma tábua de madeira de Plátano. Até recentemente a maior parte dos adesivos evoluíram de substâncias vegetais, animais ou minerais [1].

A primeira patente atribuída a um adesivo ocorreu em 1750 na Inglaterra e tratou-se de uma cola elaborada a partir de peixe. Nos primeiros anos do século XX surgiram fábricas de adesivos por todo o mundo. Durante a primeira e segunda guerras mundiais promoveram um incremento na utilização da ligação adesiva através da indústria aeronáutica. As patentes seguintes foram para colas à base de borracha natural, leite, caseína e goma [2].

O desenvolvimento de adesivos poliméricos modernos teve início praticamente ao mesmo tempo que o desenvolvimento da própria indústria de polímeros no início do séc. XX. Na verdade, a indústria de resinas poliméricas e elastómeros está muito ligada à indústria dos adesivos [1]. As aeronaves do início do século XX usaram adesivos baseados em caseína (material polimérico natural derivado do leite). Esses adesivos naturais funcionavam bem exceto quando submetidos a ambientes húmidos, tornando-se muito fracos e exalavam odores desagradáveis devido à absorção da água. O problema da fraca durabilidade dos adesivos baseados em produtos naturais foi ultrapassado pela introdução de adesivos sintéticos poliméricos durante segunda guerra mundial onde, por exemplo, o famoso caça britânico Mosquito usava uma resina de ureia-formaldeído para colar a sua estrutura de madeira. Tal como este as resinas fenólicas eram utilizadas para ligação de metais, no entanto esses tipos de adesivos eram bastante frágeis e fraturavam com facilidade. Este problema da fragilidade dos primeiros adesivos foi ultrapassado ainda nos anos 40 por Bruyne e seus colegas, que modificaram a química dos adesivos adicionando polímeros com uma boa tenacidade. Esta invenção representou um desenvolvimento muito importante na tecnologia dos adesivos e permitiu a ligação de materiais metálicos e de madeira com muito sucesso. Os trabalhos pioneiros de engenheiros britânicos nos anos 40 e 50 levaram à construção de aviões modernos que dependem da utilização de adesivos [3]. Na Figura 1

apresenta-se alguns trabalhadores a aplicar adesivo na fuselagem de madeira de um avião “Mosquito”.



Figura 1 – Aplicação de adesivo na fuselagem de madeira de um avião “Mosquito” em 1944 [4].

Ao longo da história, observa-se que os sistemas adesivos têm substituído os sistemas de fixação mecânica em aplicações de interesse industrial. Vantagens técnicas relacionadas com o desempenho de reparações adesivas, associadas aos fatores de produtividades e menor custo dos adesivos, são os fatores determinantes [2]. Estas vantagens, bem como as desvantagens deste método de ligação, serão detalhados posteriormente. Na Figura 2 apresenta-se alguns tipos de aplicações de ligações adesivas na indústria ferroviária e dos transportes.

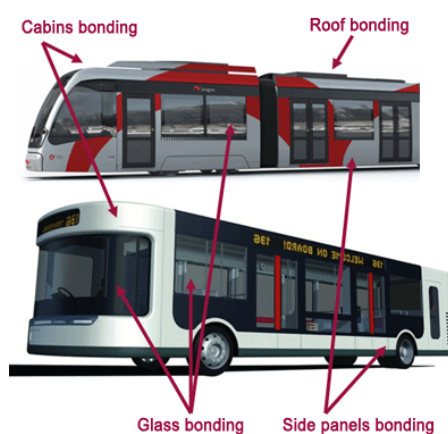


Figura 2 – Exemplo de aplicação de ligações adesivas em veículos [5].

Devido aos desenvolvimentos na tecnologia dos adesivos, que resultaram numa maior resistência ao corte e ao arrancamento, e também devido ao aumento da ductilidade até à

rotura, este tipo de ligações tem vindo a substituir progressivamente os sistemas de fixação mecânica convencionais, como por exemplo os parafusos, a brasagem, a rebitação, a soldadura, entre outros, permitindo o uso de ligações mais fortes e leves [6]. Os adesivos são de vasta aplicação e podem ser agrupados por diversos critérios de seleção. Pode-se classificar os adesivos segundo a sua natureza, composição química, estrutura molecular, tipos de aderente em que podem ser utilizados, custos, desempenho ou função, etc. Um modo de se poder classificar os adesivos será através de uma separação em grupos que apresentem propriedades semelhantes e que estão intrinsecamente ligadas às características da estrutura molecular do material. Segundo este critério pode-se classificar os adesivos de acordo com as três grandes famílias dos materiais poliméricos: as resinas termoplásticas, resinas termoendurecíveis e elastómeros. Outra classificação possível para adesivos é segundo a origem. Segundo este critério, os adesivos podem ser classificados em naturais, sintéticos e semi-sintéticos. Os adesivos também podem ser classificados em função do material a colar, como por exemplo: adesivos para madeira, adesivos para metais, adesivos para plásticos, etc. Os adesivos podem ser classificados por variadas maneiras, propriedades, características, etc., mas uma das maneiras mais importantes de se classificar os adesivos é através do seu desempenho. Surgem assim dois grandes grupos: os adesivos estruturais e os adesivos não estruturais (Tabela 1; [7]). Neste trabalho, é efetuada uma análise com maior ênfase aos adesivos estruturais, pois estes são os mais representativos na atualidade e também os mais importantes.

Admitindo o adesivo como parte integrante da estrutura, em oposição aos produtos de revestimento ou de estanquicidade, este deve apresentar uma resistência equivalente aos materiais constituintes da estrutura a ser colada. Nesta perspetiva a designação de adesivo estrutural é atribuída aos adesivos capazes de transmitir esforços de grandeza considerável, sendo habitual considerar nesta categoria as seguintes famílias: fenólicos, acrílicos, poliuretanos, poliimidas, epóxidos, [7 e 8].

Tabela 1 – Classificação dos adesivos segundo o seu desempenho [7].

| ADESIVOS | | | |
|-------------|---|----------------------|---|
| Estruturais | | Não estruturais | |
| Fenólicos | fenólicos-vinílicos fenólicos-nitrilo fenólicos-policloropreno | Borrachas sintéticas | silicone policloropreno e nitrilo polisulfureto |
| Acrílicos | anaeróbicos cianoacrilatos | Poliésteres | |
| Poliuretano | | Termofusíveis | |
| Poliimida | | Inorgânicos | |
| Epóxido | epóxido-poliamida epóxido-polisulfureto epóxido-fenólicos epóxido-poliuretano epóxido-nitrilo | | |

Segundo Pocius [9], um adesivo estrutural pode ser definido como sendo um material de elevada resistência utilizado para unir outros materiais, como por exemplo madeira, compósitos, ou metal, permitindo que a resistência da ligação adesiva ao corte exceda os 6,9 MPa à temperatura ambiente. Também se considera o adesivo estrutural como um material que não sofre fluência sob ação de cargas significativas [1]. Em muitas aplicações, são necessários adesivos estruturais para garantir uma boa ligação adesiva em ambientes adversos e que resista durante anos ou mesmo décadas. Segundo Gauthier [10], um adesivo estrutural é definido como um material capaz de transferir as forças aplicadas à junta em condições de serviço ou, alternativamente, como um material com elevada fiabilidade em aplicações nas quais a ligação deve ser mantida, sem ocorrência de rotura, mesmo quando sujeita a solicitações significativas por um longo período de tempo. A Tabela 2 apresenta as propriedades típicas de alguns adesivos estruturais.

Tabela 2 – Propriedades dos adesivos estruturais [11].

| Tipo | Apresentação | Temp. máxima de utilização em contínuo [°C] | Resistência | | | | |
|-------------------------|---|---|-------------|----------|--------------|----------|-----------|
| | | | Corte [MPa] | Fluência | Arrancamento | Choques | Solventes |
| Fenólico-vinílico | Líquido monocomponente Líquido + pó Filme | 100 a 130 | 17 a 35 | boa | média | boa | mediocre |
| Fenólico-Nitrilo | Líquido monocomponente Filme | 140 a 170 | 15 a 30 | boa | média | boa | boa |
| Anaeróbicos (acrílicos) | Líquido monocomponente | 120 a 150 | 10 a 40 | média | boa | boa | média |
| Cianocrilato | Líquido monocomponente | 80 | 10 a 35 | má | mediocre | má | má |
| Poliuretano | Líquido de dois componentes | 90 | 8 a 15 | boa | média | boa | boa |
| Poliimida | Filme | 250 a 300 | 10 a 15 | má | boa | mediocre | boa |
| Epóxido | Diversa | 80 a 150 | 15 a 45 | mediocre | boa | má | boa |
| Epóxido-Poliamida | Líquido de dois componentes | 80 | 15 a 25 | boa | mediocre | boa | mediocre |
| Epóxido-Polisulfido | Líquido de dois componentes | 80 | 15 a 25 | boa | mediocre | boa | boa |
| Epóxido-Fenólico | Líquido monocomponente | 200 a 250 | 20 | mediocre | boa | má | boa |
| Epóxido-nitrilo | Filme | 100 a 120 | 10 a 46 | média | boa | boa | boa |

2.2. Juntas adesivas

Os adesivos são substâncias de natureza polimérica que são utilizadas para unir dois ou mais materiais sólidos ao longo da respetiva superfície de contato. Como se pode verificar na Figura 3 este tipo de ligação é definido como um processo de união que utiliza uma substância não metálica (adesivo) que ao curar, através de uma reação de polimerização, promove a ligação dos aderentes (substratos) ao longo das suas superfícies de contato (adesão) e adquire resistência interna (coesão) [6].

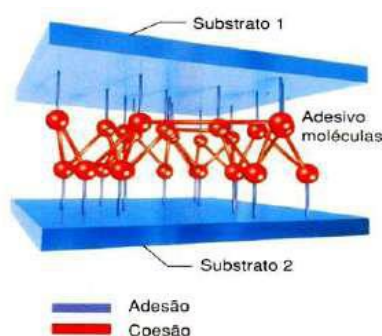


Figura 3 – Aspeto de ligação adesiva através da adesão e coesão [6].

As ligações adesivas são vastamente aplicadas em várias indústrias, como por exemplo na indústria aeroespacial, grande parte das ligações da fuselagem na construção do avião *Cessna Citation III* são efetuadas através do uso de adesivos, Figura 4. Este tipo de ligações também é muito utilizado na indústria de construção civil, ver Figura 5 (a) e (b), na construção de máquinas, ver Figura 6, na indústria eletrônica, ver Figura 7, e também na indústria automóvel, Figura 8, chegando a ser utilizado por média em cada veículo cerca de 20 kg de adesivos. Durante os próximos anos, estima-se que o aumento do uso de ligações adesivas, seja de 7 % [12].



Figura 4 – Partes constituintes do avião *Cessna Citation III* ligadas por adesivos [13].

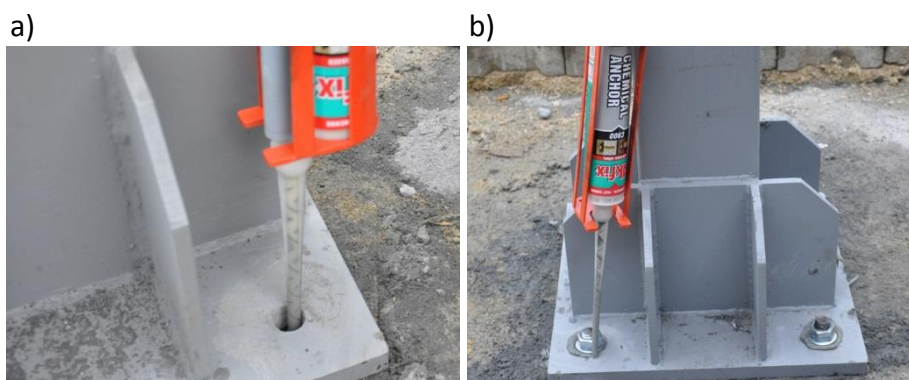


Figura 5 – Exemplo de utilização de adesivos nas sapatas de pilares (a) e (b) [14].



Figura 6 – Exemplo de utilização de adesivos em componentes de máquinas [15].



Figura 7 – Exemplo de utilização de adesivos em componentes de eletrónica [16].

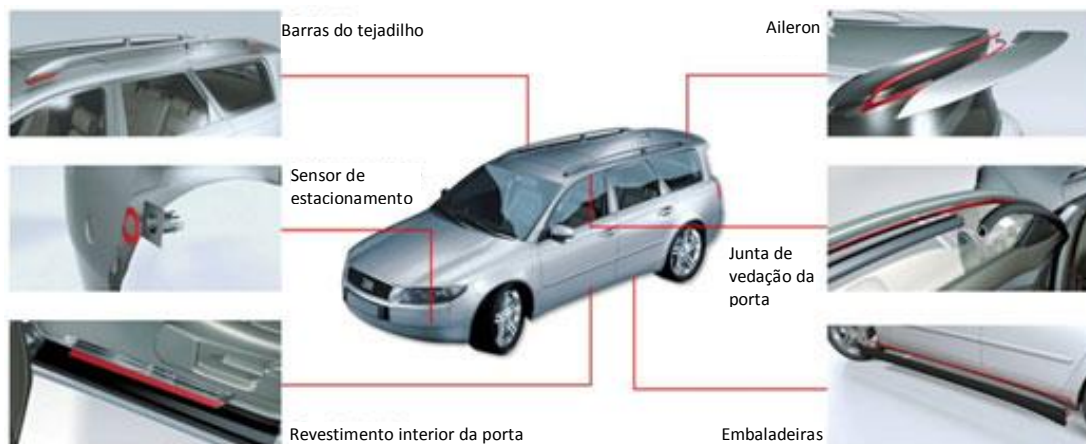


Figura 8 – Exemplos de utilização de adesivos em componentes de automóveis [15].

2.2.1. Vantagens e desvantagens das juntas adesivas

As ligações adesivas, devido às suas diversas vantagens, têm vindo progressivamente a substituir os métodos tradicionais de ligação tais como a soldadura, brasagem, aparafusagem, rebitagem e outras ligações mecânicas. As principais vantagens apontadas às ligações adesivas estruturais são [3]:

- Redução do peso da estrutura;
- Redução ou eliminação de concentração de tensões (especialmente ao longo da largura);

- Distribuição mais uniforme das tensões, o que permite uma maior rigidez e uma maior transferência de carga, o que origina uma resistência à fadiga superior;
- Elevada capacidade de amortecimento de vibrações;
- Possibilidade de ligação e vedação simultânea, aumentando também o isolamento acústico;
- Capacidade de ligar metais suscetíveis de desenvolver corrosão galvânica;
- Admite a fixação de diferentes tipos de materiais e com distintos coeficientes de expansão;
- Custo globalmente inferior devido ao processo de fabricação mais económico e facilidade de automatização;
- Melhor aparência e aerodinâmica dada a variedade de projetos possíveis e capacidade para unir superfícies irregulares e formas complexas.

Na Figura 9 (a) e (b) apresenta-se alguns exemplos de fabricação de juntas adesivas automatizadas. Como já referido anteriormente, os métodos de fixação mecânica mais tradicionais, que recorrem ao uso de parafusos e rebites, apresentam concentração e uma distribuição de tensões muito menos uniforme, quando comparados com as ligações adesivas. Na Figura 10 (a) apresenta-se uma ligação aparafusada/rebitada, em que se pode observar picos de tensão próximo da zona das furações, enquanto na Figura 10 (b), se apresenta uma ligação adesiva na qual se pode visualizar uma distribuição de tensão uniforme ao longo da largura da área colada. Apesar disto, deve-se referir que as juntas adesivas exibem concentração de tensões na direção da solicitação que não devem ser desprezadas.

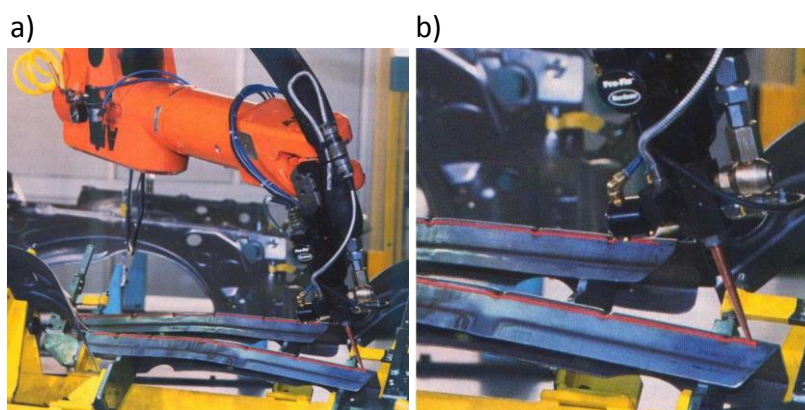


Figura 9 – Exemplos de fabricação de ligações adesivas automatizadas (a) e (b) [17].

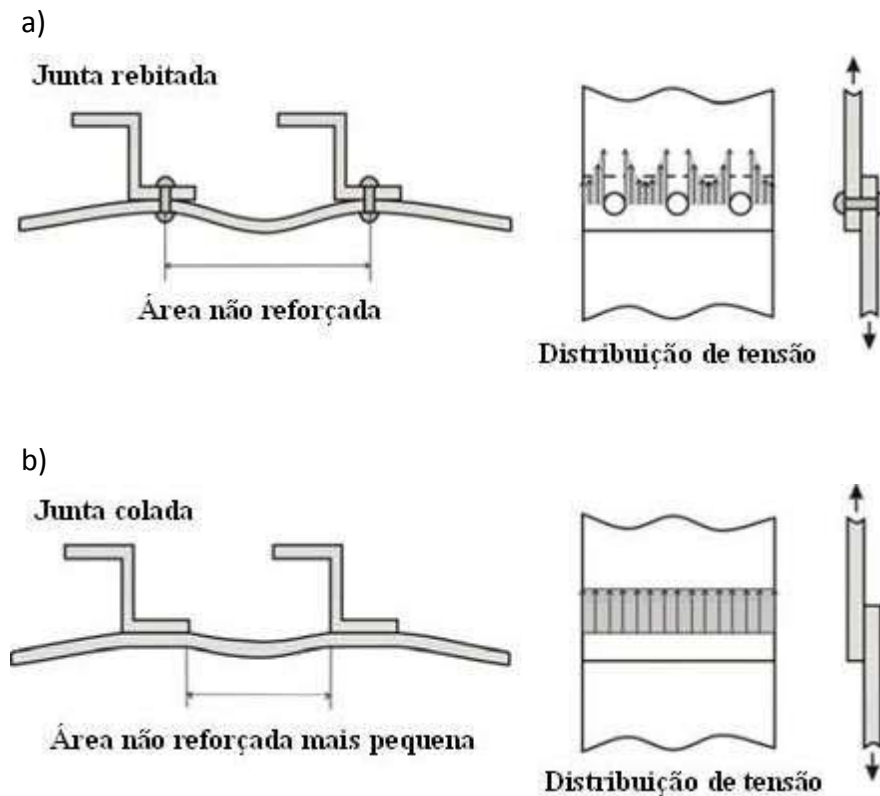


Figura 10 – Distribuição da tensão numa junta rebitada (a) e numa junta colada (b) [3].

Apesar de apresentarem um grande número de vantagens, as ligações adesivas também apresentam algumas desvantagens e limitações, que é necessário ter em conta, como por exemplo [3]:

- Fraca resistência à propagação de fissuras de alguns adesivos e fraca resistência ao arrancamento;
- Reduzida resistência a condições extremas tais como a temperatura e a humidade;
- Eventual necessidade de cura dos adesivos a elevadas temperaturas (forno, prensa, etc.);
- Necessidade de um tratamento das superfícies a ligar;
- Morosidade do processo de cura do adesivo;
- Muitas vezes os custos de fabrico são mais elevados do que a fixação mecânica;
- Normalmente são impossíveis ou difíceis de desmontar;
- Difícil inspeção para verificação da qualidade da ligação e apresentam problemas de inflamabilidade e toxicidade.

2.2.2. Esforços e rotura em juntas adesivas

Numa ligação adesiva, o principal objetivo é que a junta colada seja o mais resistente possível, ou seja, para uma determinada aplicação a junta deve suportar as cargas a que vai estar sujeita. Para isso, é importante entender e determinar os vários tipos de esforços a que uma ligação adesiva pode estar sujeita, como por exemplo [18], (ver Figura 11):

- **Esforços de Tração** – As tensões de tração desenvolvem-se quando as forças atuam perpendicularmente ao plano de colagem;
- **Esforço de Compressão** – São forças que tendem a comprimir um aderente contra o outro;
- **Esforço de Corte** – Na tensão de corte tende a haver deslizamento entre os aderentes ao longo uma da outra;
- **Esforços de Clivagem** – São provocados por forças perpendiculares ao plano da junta e na extremidade de substratos rígidos e;
- **Esforços de Arrancamento** – É um tipo de esforço com algumas semelhanças ao de clivagem. No entanto, no caso do arrancamento um ou os dois aderentes são bastante flexíveis e podem deformar plasticamente por ação das forças aplicadas. Como consequência, apenas uma porção muito reduzida do adesivo é solicitada, o que reduz consideravelmente a resistência da ligação.

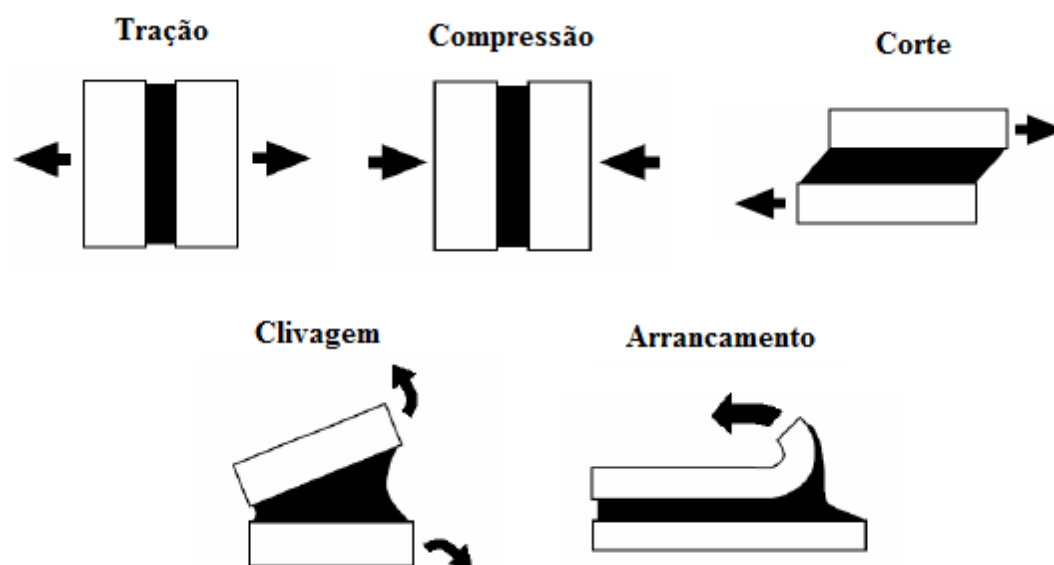


Figura 11 – Esquema representativo dos vários esforços de uma ligação adesiva [18].

Os esforços de clivagem e arrancamento devem, sempre que possível, ser evitados em juntas coladas, devendo-se utilizar configurações que suportem maioritariamente esforços de corte. Este princípio não é respeitado em juntas de sobreposição simples, que exibem tensões de arrancamento acentuadas nas extremidades da ligação, devido à flexão significativa que sofrem sob tração [2]. Desta forma, conclui-se que a rigidez dos aderentes afeta consideravelmente o nível de tensões de arrancamento. Os esforços de clivagem podem também acontecer em juntas de topo a topo sob carregamento axial, se as forças não forem rigorosamente axiais. De uma forma geral, as juntas sujeitas a este tipo de tensões são menos resistentes do que as solicitadas principalmente ao corte, porque as tensões de clivagem e arrancamento se concentram normalmente em zonas mais localizadas da ligação adesiva (numa ou nas duas extremidades da ligação). Assim, facilmente se compreende que as juntas de sobreposição dupla são mais favoráveis do que as de sobreposição simples, já que, devido à simetria dos esforços e diminuição drástica da flexão, o adesivo é fundamentalmente sujeito a esforços de corte [2].

Tal como referido no início deste ponto, o objetivo das ligações adesivas estruturais é que a junta colada seja o mais resistente possível. Portanto, espera-se que a rotura ocorra preferencialmente pelo substrato e nunca na interface ou pela camada adesiva. O modo de rotura é um fator importante na análise de uma junta, visto que evidencia a zona menos resistente da mesma e permite ao projetista avaliar eventuais erros de projeto e implementar alterações dos procedimentos de fabrico. Os quatro principais modos de rotura para uma junta adesiva são os seguintes [6], (ver Figura 12):

- **Rotura Coesiva no Adesivo:** rotura interna na região do adesivo, indicando que a resistência do adesivo é menor do que a resistência dos substratos e da ligação entre adesivo e substratos;
 - **Rotura Coesiva no Substrato:** rotura ocorre pelo substrato. No caso de materiais compósitos, indica que a resistência interlaminar do material compósito é inferior à do adesivo e da ligação;
 - **Rotura Adesiva:** rotura na interface entre substrato e adesivo. É geralmente associada a uma má preparação das superfícies dos substratos;
-

- **Rotura Mista (coesiva/adesiva):** consiste numa combinação de rotura adesiva e rotura coesiva. Por vezes este modo de rotura deve-se à limpeza ineficaz numa dada região das superfícies a ligar, ou então devido a defeituosa aplicação do adesivo.



Figura 12 – Representação esquemática dos modos de rotura em juntas adesivas de sobreposição simples [19].

2.2.3. Tipos de juntas adesivas

O projeto de ligações estruturais tem de basear-se na previsão das forças, e consequentemente das tensões, que provavelmente ocorrerão em serviço. O projetista deve utilizar as técnicas e materiais disponíveis para encontrar a melhor solução. Embora o projeto possa e deva recorrer à experiência adquirida ao longo dos tempos, cada vez mais é necessária uma rigorosa quantificação das forças e tensões envolvidas. A forte competição nos mercados, a qual exige produtos de elevada qualidade a preços reduzidos, ou legislação cada vez mais exigente no que diz respeito à responsabilização pela segurança e fiabilidade das estruturas, são exemplos das pressões a que o projetista está atualmente sujeito [1]. Isto resulta na necessidade de análises detalhadas das estruturas e particularmente das suas ligações.

As ligações adesivas são cada vez mais utilizadas em aplicações estruturais. Na Figura 13 mostram-se as configurações de juntas mais comuns. Como ilustrado na Figura 13, na maioria destas juntas os substratos são sujeitos a carregamentos trativos [20].

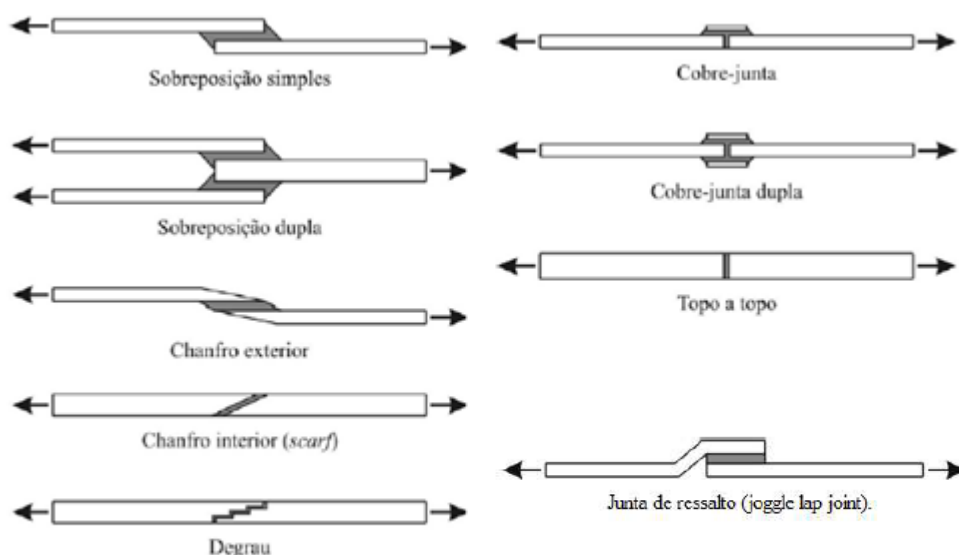


Figura 13 – Tipos de juntas mais comuns [3].

A **junta de sobreposição simples** é a mais frequentemente usada em aplicações industriais, porque é a mais simples de fabricar [21 e 22]. Todavia, a aplicação descentrada da carga provoca efeitos de flexão, que originam o aparecimento de tensões normais na direção da espessura do adesivo (arrancamento), reduzindo a resistência da junta [23 e 24]. Também existem concentrações de tensões de corte nas extremidades da sobreposição devido à deformação gradual dos aderentes ao longo da sobreposição [23 e 24]. Para eliminar a flexão dos substratos, pode-se recorrer a **juntas de sobreposição dupla**, em que as tensões de arrancamento são consideravelmente inferiores. Este facto, aliado à diminuição dos gradientes de deformação dos aderentes na zona da sobreposição, leva a que as juntas de sobreposição dupla excedam o dobro da resistência das juntas de sobreposição simples (relação de áreas dos dois tipos de juntas). No entanto, a fabricação deste tipo de junta é mais morosa [23 e 24].

As **juntas topo a topo planas** são as mais simples de fabricar. No entanto, não apresentam uma eficácia elevada, devido à solicitação de arrancamento e área colada reduzida. Além disso, este tipo de juntas não suporta esforços de flexão porque o adesivo, neste caso, estaria sujeito a clivagem [25 e 26].

A utilização de **juntas com chanfro interior ou em degraus** permite a diminuição dos gradientes de tensões ao longo do adesivo, o que leva à elevada resistência destas juntas

[27]. A significativa diminuição da excentricidade dos esforços também contribui para este facto. No entanto, devido à dificuldade de maquinar os degraus ou as rampas neste tipo de juntas, o processo de fabrico tem custos superiores às restantes juntas. No caso das juntas em degrau, com substratos em compósito, é comum e mais económico executar os degraus durante o empilhamento e antes da cura, evitando assim a danificação das fibras [7].

Nas **juntas com chanfro exterior** a resistência depende do ângulo do chanfro na zona da sobreposição, ou seja, quanto maior for a extensão do chanfro, maior será a resistência das juntas (embora limitada pela resistência dos aderentes, fragilizados devido à existência dos chanfros). Este comportamento deve-se à diminuição das tensões de arrancamento nas extremidades da sobreposição e dos gradientes de tensões de corte. No entanto, tal como as juntas anteriores (com chanfro interiores ou em degraus), também o processo de fabrico das juntas com chanfro exterior tem custos superiores às restantes juntas, devido à dificuldade de maquinação das rampas neste tipo de juntas [6].

A solução mais simples e eficaz para garantir um alinhamento das forças numa junta de sobreposição simples é a utilização da **junta de ressalto**, apesar deste tipo de junta apresentar dificuldades de fabricação acrescidas, especialmente para substratos frágeis ou de elevada resistência [6].

As **cobre-juntas** e **cobre-juntas duplas** são comumente associadas à ligação expedita de aderentes que devem permanecer colineares ou à reparação de estruturas danificadas. Neste último caso, o processo de reparação é levado a cabo pela criação de caminhos alternativos de transferência de esforços, através de um ou dois remendos colados na zona da descontinuidade. Em termos de características, pode ser feita a analogia às juntas de sobreposição simples e dupla, sendo de realçar que no caso de reparação de uma cobre-junta dupla pode não ser possível aceder a ambos os lados da estrutura para aplicação do remendo [6].

Os diversos estudos teóricos e experimentais realizados sobre as juntas coladas permitiram estabelecer uma série de regras que devem ser consideradas no projeto de uma junta. Deve-se então [7]:

- Projetar a estrutura de modo a que a junta seja facilmente executável. O acesso do técnico deve ser fácil para que a preparação das superfícies e a colagem decorram sem problemas;
 - Projetar as juntas de modo a que a transferência de carga se processe por corte ou por compressão;
 - Selecionar o adesivo adequado às características da aplicação (boa resistência mecânica, térmica, química, etc.), tendo em conta que altas resistências ao corte e à tração e baixos módulos de corte e longitudinal são características favoráveis. Um método eficiente de aumentar a resistência da junta consiste em usar um adesivo de baixo módulo unicamente na extremidade da zona de sobreposição, reduzindo assim a concentração de tensões, e um adesivo de alto módulo na zona central para suportar a maior parte da solicitação;
 - Garantir uma espessura ótima para o adesivo (entre 0,1 e 0,3 mm), necessária à obtenção do melhor desempenho da junta. Espessuras muito finas aumentam o risco de falhas de colagem e espessuras grandes apresentam maior probabilidade da presença de defeitos e de maiores dimensões;
 - Incluir no projeto as tensões de origem térmica provocadas pelos diferentes coeficientes de expansão térmica quando se procede à colagem de materiais diferentes;
 - Projetar a junta de tal modo que a rigidez axial dos dois substratos seja idêntica, ou seja, $E_1 t_1 = E_2 t_2$;
 - Preferir adesivos de alta ductilidade quando se está em presença de solicitações de impacto ou os substratos apresentam rigidez distinta;
 - Usar valores suficientemente elevados para o rácio comprimento de sobreposição (L) / espessura do substrato (t). De facto, a resistência da junta aumenta significativamente com L/t para valores pequenos deste. Todavia, a partir de determinados valores de L/t , o ganho de resistência é marginal e o peso do conjunto
-

aumenta desnecessariamente e adelgaçar as extremidades dos substratos ou aumentar localmente a espessura da resina nas extremidades da zona de sobreposição, o que reduz a concentração de tensões normais nas referidas zonas.

Na Figura 14 apresenta-se uma comparação entre resistência de adesivos dúcteis e frágeis em função do comprimento de sobreposição. Observa-se pela Figura 14 que os adesivos dúcteis têm maior resistência comparativamente aos adesivos frágeis, pois os adesivos dúcteis apresentam um patamar de deformação plástica, enquanto os frágeis não.

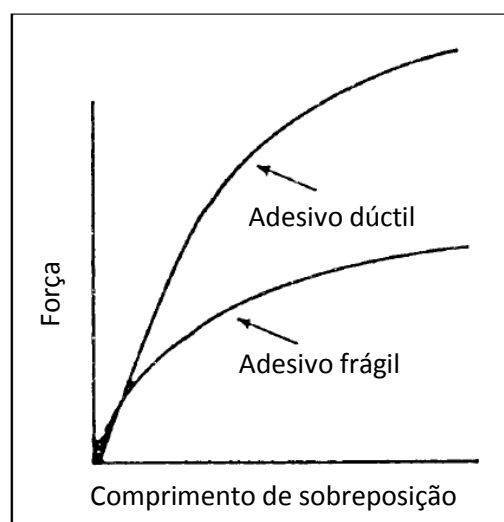


Figura 14 – Influência do comprimento de sobreposição de adesivo na força de rotura para adesivos dúcteis e frágeis [1].

2.3. Tipos de reparações adesivas

Grande parte dos componentes usados na indústria aeronáutica, automóvel, de estruturas, etc., é bastante dispendiosa, fazendo com que a substituição destas estruturas que se encontram danificadas por novas, não seja a metodologia mais apropriada. De modo a evitar a substituição de componentes, tem-se vindo a apostar em técnicas de reparação que permitem corrigir a estrutura danificada a um baixo custo e promovendo novamente a integridade estrutural do componente. Na Figura 15 apresenta-se a reparação na asa de um avião em que o dano foi provocado por fogo terrestre.

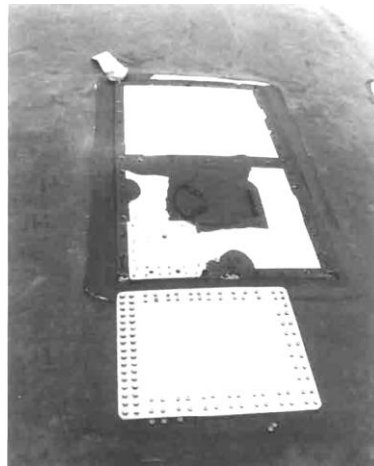


Figura 15 – Reparação na asa de um avião Lockheed Hercules C130, caso típico de dano provocado por impacto explosivo oriundo de fogo terrestre [28].

2.3.1. Descrição dos tipos de reparações mais comuns

Nas reparações de estruturas de engenharia existem várias configurações diferentes de reparações adesivas. As técnicas mais comuns são as reparações por sobreposição simples (SS), reparações por sobreposição dupla (SD), e as reparações por remendo embebido (*scarf*).

As reparações por SS consistem na remoção por perfuração da zona danificada, sendo de seguida colado, recorrendo ao uso de um adesivo, um remendo de forma circular concêntrico com o furo numa das faces da zona removida. Este tipo de reparação é utilizado após um componente ou estrutura, ter sofrido dano numa zona intermédia, (Figura 16 e Figura 17). Na Figura 16 apresenta-se a geometria da reparação SS em 3D e na Figura 17 apresenta-se uma aproximação bidimensional da reparação 3D.

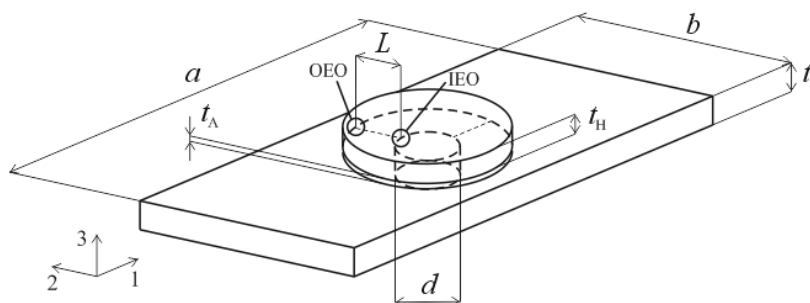


Figura 16 – Geometria da reparação SS em 3D.



Figura 17 – Geometria da técnica de reparação SS em 2D [29].

Todas juntas são simplificadas em metade e em relação ao eixo de simetria, isto é devido a existir simetria geométrica e de aplicação de carga na reparação por remendo de sobreposição simples, (ver Figura 18), [30 e 31].



Figura 18 – Geometria da reparação SS em 2D dividida pelo seu eixo de simetria [30 e 31].

A técnica de reparação por SS é um tipo de reparação encontrada em muitas aplicações estruturais [32] estudada por Hu et al. [33]. Pela investigação levada a cabo por estes autores, pode-se concluir que a rotura da reparação ocorre devido aos picos de tensão de arrancamento (σ_y) e corte (τ_{xy}) perto do centro do furo originado pela remoção do material danificado. Este tipo de reparação é caracterizado por ser de fácil execução e por originar uma excentricidade da carga transmitida, dando origem a uma flexão significativa na região da reparação que provoca picos de tensão de arrancamento nas extremidades da sobreposição [34 a 37], (ver Figura 19). Estes picos, somados ao desenvolvimento de picos de tensão de corte, na mesma região, originados pela deformação diferencial dos componentes envolvidos na reparação, provocam uma baixa eficiência deste tipo de reparação [38 a 41]. Consequentemente a técnica de reparação por SS, não pode ser utilizada como uma reparação permanente, nem pode ser utilizada em estruturas de elevada responsabilidade nem sujeita a esforços elevados [23, 42 e 43].

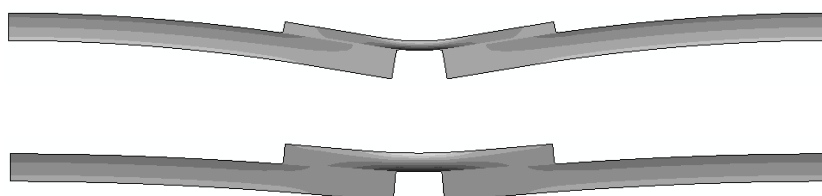


Figura 19 – Configurações deformadas de reparações SS [44].

A técnica de reparação SD é similar à técnica das reparações SS, mas em vez de se colar um remendo numa das faces da zona danificada, são colados dois remendos, um em cada face na zona danificada de forma concêntrica com furo oriundo da remoção de material danificado (Figura 20 e Figura 21). A Figura 22 representa uma reparação SD, simplificada pelos seus dois eixos de simetria em relação aos planos xoy e $yozy$. Esta simplificação pode ser efetuada pois existe simetria geométrica como de cargas aplicadas. Na Figura 20 apresenta-se a geometria da reparação SD em 3D e na Figura 21 apresenta-se uma aproximação bidimensional da reparação 3D.

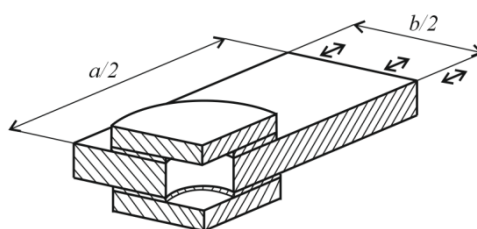


Figura 20 – Geometria da reparação SD em 3D.



Figura 21 – Geometria da reparação SD em 2D [29].

Como anteriormente descrito, de modo a simplificar as reparações SD, estas também podem ser consideradas a metade pelo seu eixo de simetria (ver Figura 22).

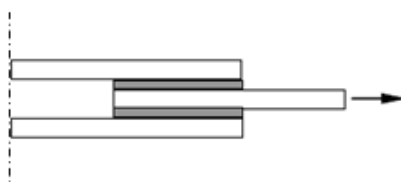


Figura 22 – Geometria da reparação SD em 2D dividida pelo seu eixo de simetria [30 e 31].

As reparações SD são mais eficientes que as reparações SS devido à duplicação da área de corte de adesivo e à eliminação da flexão do substrato, uma vez que as cargas são simétricas [23, 42 e 44]. A aplicação dos dois remendos reduz o pico das tensões de arrancamento e também aumenta significativamente a resistência da reparação [23, 45 e 46]. Por outro lado, as tensões de corte também se tornam mais niveladas ao longo de todo o comprimento da

ligação adesiva [23, 38, 39 e 47]. Mesmo assim, ainda ocorre uma ligeira flexão nos remendos, (ver Figura 23), originando esforços de compressão no interior da zona de ligação, e esforços de arrancamento no exterior da zona de ligação [23, 39, 47 a 49]. A utilização da técnica de reparação SD pode não ser de fácil execução em todos os casos, pois fica-se dependente da acessibilidade a ambas as faces da zona danificada, obrigando deste modo muitas das vezes a efectuar a desmontagem parcial da estrutura [35].

É de referir que dependendo da aplicação tanto as reparações SS como as SD devem ser consideradas como reparações temporárias, com o único objetivo de restabelecer a força necessária que apenas permita o funcionamento do componente, ou estrutura, até poder ser realizada uma reparação permanente [50].

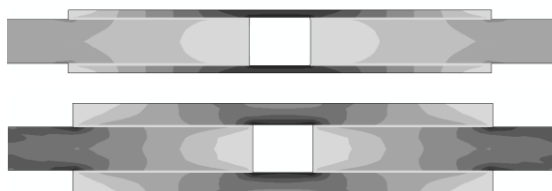


Figura 23 – Configurações deformadas de reparações SD [44].

As reparações por remendo embebido (*scarf*) representadas na Figura 24 são a última técnica de reparação apresentada neste subcapítulo. Esta é uma das técnicas mais utilizadas nos dias de hoje. A metodologia desta técnica baseia-se na remoção do dano por perfuração de um furo em forma cónica com um ângulo previamente estipulado, sendo posteriormente colado com adesivo um remendo cónico por forma a complementar a zona danificada [51 a 53]. A Figura 24 apresenta a geometria esquemática de uma reparação por remendo embebido em 3D.

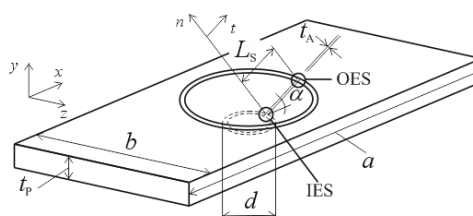


Figura 24 – Geometria da técnica de reparação por remendo embebido em 3D.

A técnica de reparação por remendo embebido vai ser apresentada de forma mais detalhadamente no subcapítulo seguinte.

2.3.2. Reparações por remendo embebido

Na Figura 25 apresenta-se uma aproximação bidimensional da reparação 3D. Para efeitos da modelação numérica as reparações por remendo embebido também podem ser simplificadas pelo seu eixo de simetria tal e qual como as reparações SS e SD. Para se poder dividir as reparações por remendo embebido é necessário que haja simetria tanto ao nível geométrico como de carga aplicada (Figura 26).



Figura 25 – Geometria da reparação por remendo embebido em 2D [29].

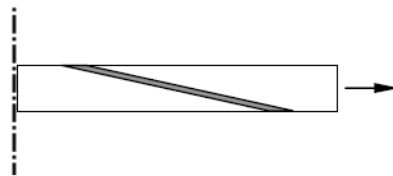


Figura 26 – Geometria da técnica de reparação por remendo embebido em 2D, de meia reparação dividida pelo seu eixo de simetria [30 e 31].

As reparações por remendo embebido têm algumas vantagens em relação às reparações SD e SS, tais como uma maior eficiência e a ausência de perturbação aerodinâmica. Devido a estas vantagens este tipo de reparação torna-se numa reparação permanente, pois consegue por norma restabelecer grande parte da resistência estrutural do componente que existia antes da ocorrência de dano [54 e 55]. De facto, elimina-se a excentricidade presente nas reparações SS causada pela aplicação dos remendos, que provocam concentração de tensões [52, 56 e 57]. Outra vantagem que esta técnica de reparação apresenta é uma distribuição de tensões mais uniforme ao longo do comprimento de ligação, este facto deve-se ao efeito da redução da espessura dos aderentes [53]. A reparação por remendo embebido tornou-se numa técnica de reparação muito importante, pois existiu um aumento gradual da utilização de painéis *sandwich* em estruturas para a indústria aeronáutica [58 e 59]. Porém este tipo de técnica também apresenta algumas desvantagens, como por exemplo a difícil execução devido à geometria dos substratos, o que implica custos de fabrico mais elevados. Além disto e de modo a se obterem resultados de resistência da reparação similares aos que se observavam na estrutura antes da ocorrência de dano, são

necessários ângulos relativamente pequenos, o que implica um aumento da zona a ser reparada e dos custos de fabrico [55, 56 e 60].

2.3.2.1. Distribuição de tensões nas reparações

Neste subcapítulo vão ser apresentados alguns estudos relativos à análise da distribuição de tensões em reparações por remendo embebido. Vão ser apresentados gráficos com os valores das tensões normalizadas de arrancamento σ_y e de corte τ_{xy} ao longo da linha média da camada de adesivo. Grande número de trabalhos realizados no âmbito de se avaliar as reparações por remendo embebido foi realizado em reparações de compósitos reforçados com fibras de carbono.

Na Figura 27 apresenta-se um estudo de reparações por remendo embebido com $\alpha=2^\circ, 3^\circ, 6^\circ, 9^\circ, 15^\circ, 25^\circ$ e 45° , realizadas em substratos de material compósito reforçado com fibras de carbono com a seguinte sequência de empilhamento, $[0_2/\pm 45/90/\pm 45/0_2]$, no qual se mostra a distribuição da tensão de arrancamento normalizada, σ_n/τ_{avg} , em que τ_{avg} representa a tensão de corte média ao longo da linha da camada de adesivo para diferentes valores de α , sendo L_t o comprimento da camada de adesivo do remendo e t a direção tangencial do eixo de coordenadas local da camada de adesivo em estudo. Na Figura 28 mostra-se a distribuição da tensão de corte normalizada, τ_{xy}/τ_{avg} , ao longo da linha da camada de adesivo para diferentes valores de α , sendo também o eixo das abcissas, t , normalizado relativamente ao comprimento de sobreposição L_t .

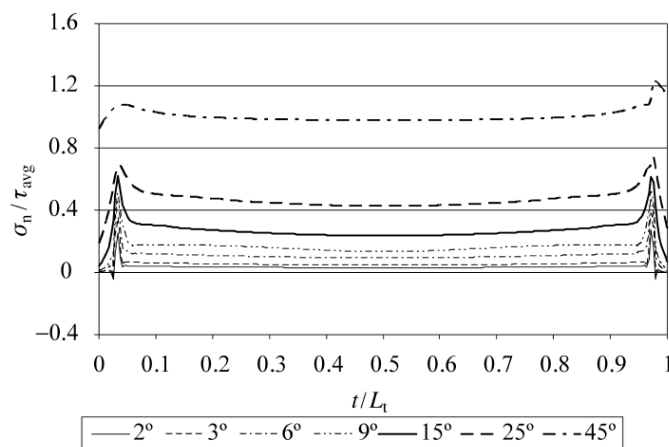


Figura 27 – Variação do valor da tensão de arrancamento normalizada, σ_n/τ_{avg} , ao longo da linha média da camada de adesivo para diferentes valores de α [56].

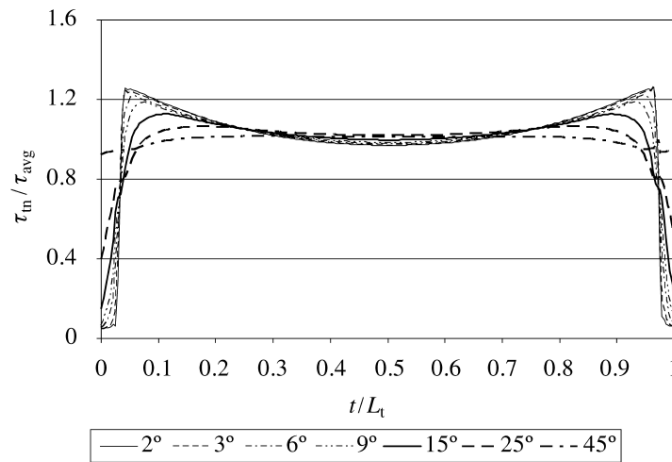


Figura 28 – Variação do valor da tensão de corte normalizada, τ_{xy}/τ_{avg} , ao longo da linha média da camada de adesivo para diferentes valores de α [56].

Para valores de α pequenos a rotura do adesivo é dominado pelas tensões de corte, e as tensões de arrancamento vão aumentando à medida que α aumenta [61 e 62]. Pela Figura 27 e Figura 28 observa-se que as tensões de arrancamento são muito menores que as tensões de corte para valores de α reduzidos, e vão apresentando um aumento da sua magnitude até α ser igual a 45° , valor de α para o qual ambas as componentes das tensões apresentam praticamente a mesma magnitude. Estes resultados estão de acordo com os resultados analíticos obtidos nas referências [63 e 64], e com os resultados numéricos obtidos na referência [56]. Os picos de tensões de corte nas extremidades da camada de adesivo da reparação para valores de α menores tendem a nivelar com o aumento de α . Torna-se ainda importante referir que as distribuições das tensões de corte não são tão influenciadas pela variação de α como as distribuições das tensões de arrancamento. A Figura 29 que corresponde a reparações por remendo embebido com $\alpha=6^\circ, 10^\circ, 18^\circ, 33^\circ$ e 45° , realizadas em substratos de aço, no qual se mostra a influência da variação de α , das reparações por remendo embebido nas tensões normalizadas de arrancamento e de corte ao longo da linha média da camada de adesivo, em que se aplica uma tensão média σ_0 nos aderentes [63].

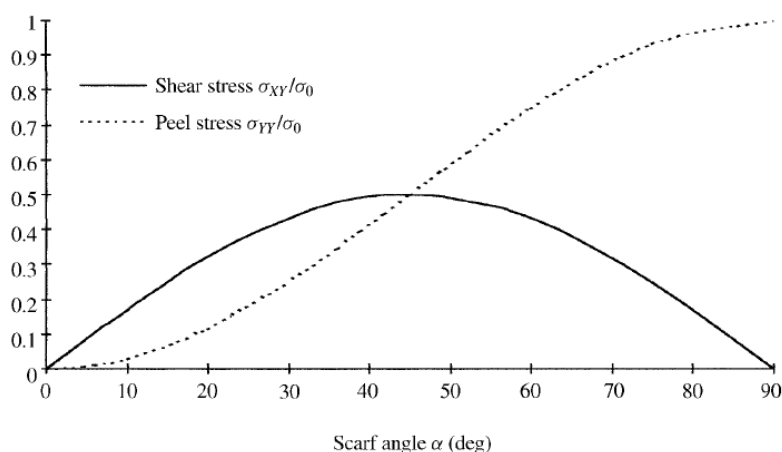


Figura 29 – Influência da variação de α nas tensões normalizadas de arrancamento, σ_y/σ_0 , e de corte τ_{xy}/σ_0 ao longo da camada de adesivo em que se aplica uma tensão média σ_0 nos aderentes [59].

Pela figura observa-se que a reparação por remendo embebido é maioritariamente solicitada por esforços de corte, quando α se encontra entre 0° e 45° . Os valores da tensão de arrancamento e de corte ficam idênticos quando α é igual a 45° . Quando α se encontra entre 45° e 90° , o valor da tensão de corte vai diminuindo, enquanto o valor da tensão de arrancamento continua a aumentar e rapidamente se torna o esforço predominante instalado na reparação [63].

As tensões de arrancamento e de corte ao longo da camada de adesivo nas reparações por remendo embebido são praticamente constantes para aderentes isotrópicos ou compósitos com sequências de empilhamento unidirecionais [56, 65 e 66]. Isto pode ser justificado por uma menor excentricidade da carga instalada, do que nas juntas ou reparações em que exista sobreposição de aderentes [23 e 60], e por um efeito de afunilamento presente na região do remendo embebido [59 e 67], que promove uma maior eficiência deste tipo de reparação em relação com a área colada, (ver Figura 30 e Figura 31), [56, 68 a 70]. Na Figura 30 e Figura 31 apresenta-se a comparação entre um estudo numérico (FE) e analítico (FD), de reparações por sobreposição simples (*single lap-joint*), e reparações por remendo embebido (*scarf joint*) em substratos de materiais diferentes.

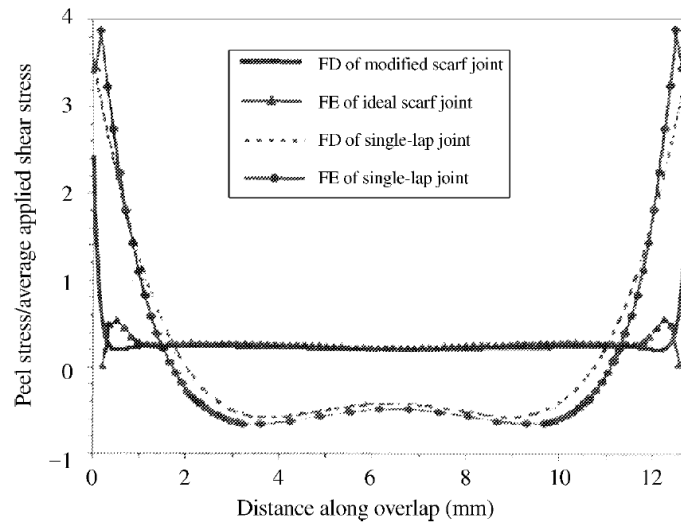


Figura 30 – Tensão de arrancamento normalizada ao longo da camada de adesivo para uma reparação por remendo embebido e para reparação por SS [70].

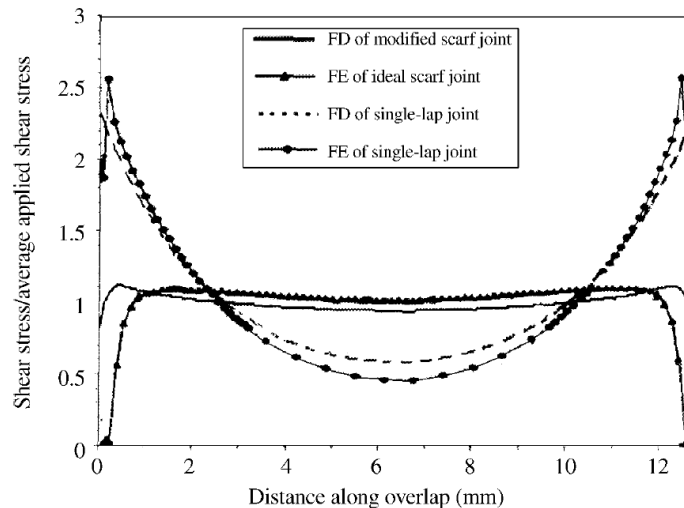


Figura 31 – Tensão de corte normalizada ao longo da camada de adesivo para uma reparação por remendo embebido e para reparação por SS [70].

2.3.2.2. Resistência das reparações

Neste subcapítulo são apresentados alguns estudos, nos quais se efetua uma comparação de resistência da reparação com a variação de α . A Figura 32 mostra as curvas força-deslocamento ($P-\delta$) para diferentes valores de α para reparações por remendo embebido $\alpha=10^\circ, 15^\circ, 25^\circ$ e 45° , realizadas em substratos de material compósito reforçado com fibras de carbono com a seguinte sequência de empilhamento $[0_2, 90_2, 0_2, 90_2]$, as curvas estão desfasadas de um valor Δ para melhor visualização. A Figura 32 mostra uma rigidez semelhante das reparações e um aumento da resistência com a diminuição de α [68].

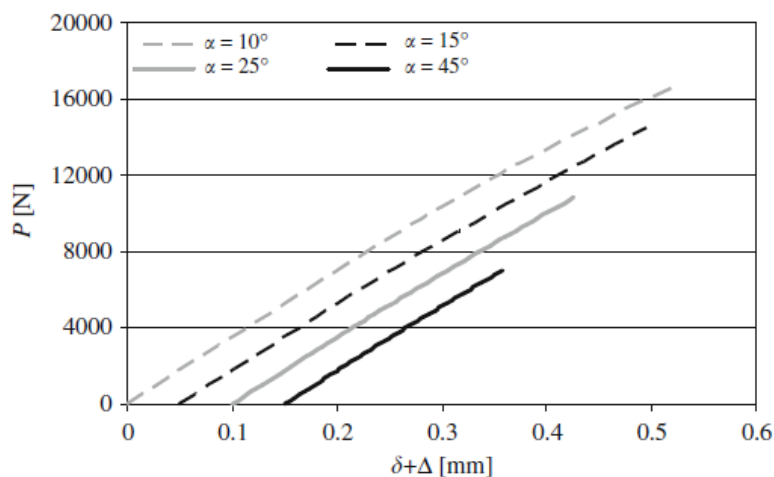


Figura 32 – Curva P - δ numérica para diferentes valores de α [68].

Os resultados apresentados na Figura 32 mostram um aumento da resistência com a redução de α . Este aumento de resistência ocorre, pois para menores valores de α aumenta-se a área de colagem o que provoca aumentos significativos da resistência da reparação [65, 68 e 69]. A Figura 33 mostra uma comparação entre trabalho numérico e experimental da resistência para reparações por remendo embebido com $\alpha=2^\circ, 3^\circ, 6^\circ, 9^\circ, 15^\circ, 25^\circ$ e 45° , realizadas em substratos de material compósito reforçado com fibras de carbono com a seguinte sequência de empilhamento, $[0_2, 90_2, 0_2, 90_2]$.

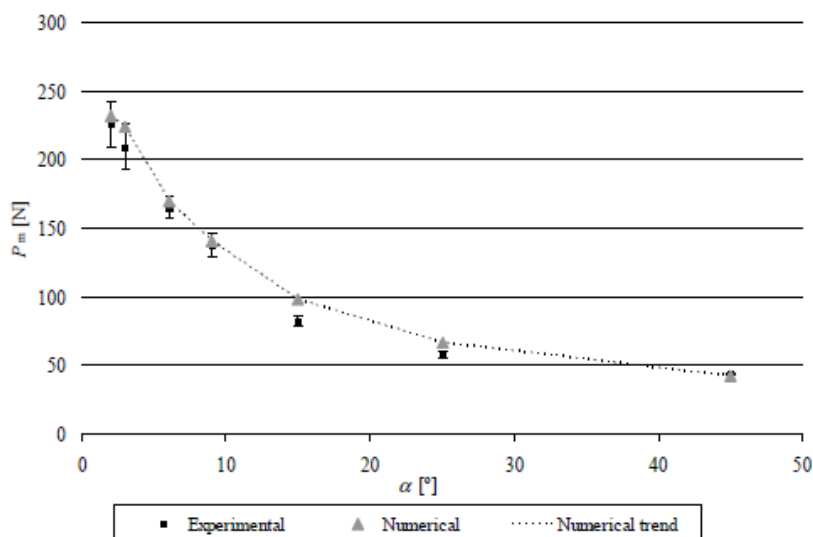


Figura 33 – Comparação de P_m em função de α entre trabalho numérico e experimental [69].

Na Figura 33 pode-se observar um aumento exponencial dos valores de P_m com a diminuição de α [68 e 69]. O aumento de resistência da reparação com a diminuição de α ocorre, pois para valores de α reduzidos implica um comprimento de ligação maiores, o que provoca um aumento global da resistência da reparação.

2.3.2.3. Técnicas de aumento da resistência

Neste subcapítulo são apresentadas algumas técnicas de aumento de resistência das reparações por remendo embebido. Uma técnica de aumento da resistência da reparação por remendo embebido é apresentada na Figura 34, e consiste na variação de α ao longo da linha do adesivo, com o objetivo de uniformização de tensão de corte.

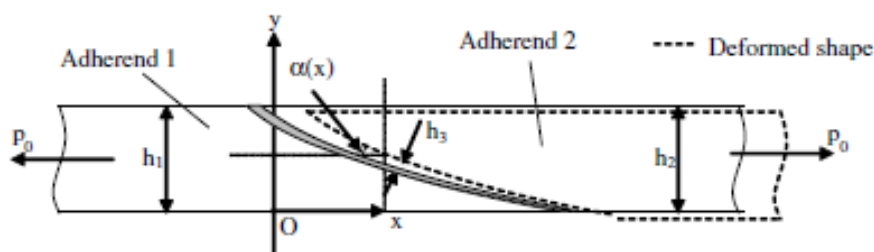


Figura 34 – Alteração da geometria da reparação por remendo embebido através da variação de α ao longo da linha do adesivo [71].

Os resultados deste estudo confirmaram que a configuração geométrica de reparação por remendo embebido ótima para aderentes com material semelhante são as que sejam executadas com a variação de α ao longo da linha do adesivo. Esta análise de otimização apresenta que a distribuição da tensão de corte é mais uniforme na camada de adesivo com a variação de α ao longo da linha do adesivo [71].

Uma alternativa para se evitar α muito reduzidos e poder-se restaurar a resistência da estrutura consiste na aplicação de reforços externos ligados adesivamente sobre a zona reparada, ver Figura 35, de modo a se reduzir os picos de tensões nas extremidades da ligação e criação de caminhos alternativos de transferência de esforços [72]. A solução mais eficiente passa por colar reforços em ambas as faces da reparação mas muitas vezes por motivos construtivos e por não se conseguir acesso à parte interior da estrutura só se aplica reforços exteriores [68]. A Figura 35 apresenta a geometria da reparação por remendo embebido com reforços aplicados em cada uma das faces da reparação com $\alpha=5^\circ$, 10° , 15° ,

25° e 45°, realizadas em substratos de material compósito reforçado com fibras de carbono com a seguinte sequência de empilhamento $[0_2, 90_2, 0_2, 90_2]$ e os reforços são constituídos por duas camadas de material compósito reforçado com fibras com a seguinte sequência de empilhamento $[0^\circ, 90^\circ]$.

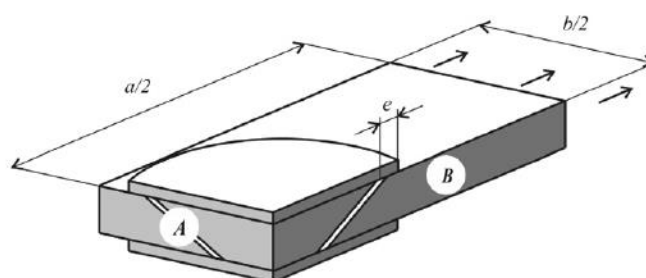


Figura 35 – Idealização da geometria de reparação por remendo embebido com reforços aplicados em cada uma das faces da reparação [68].

A utilização desta técnica apresentou uma redução significativa dos picos de tensão de arrancamento e de corte na ligação, que de outra forma se iriam desenvolver perto da extremidade da camada adesiva da reparação [68]. Foram considerados a utilização apenas de reforços na face exterior, (reforço simples), e em ambas as faces da reparação (reforço duplo). Para o caso de se aplicar apenas reforço exterior foram considerados valores de $e=2,5$ mm e 5 mm (ver Figura 35), e largura de aderentes de 50 mm e de 80 mm, e para o caso de se aplicar reforços em ambas as faces só se considerou $e=5$ mm e largura dos aderentes (b) de 50 mm e de 80 mm [68].

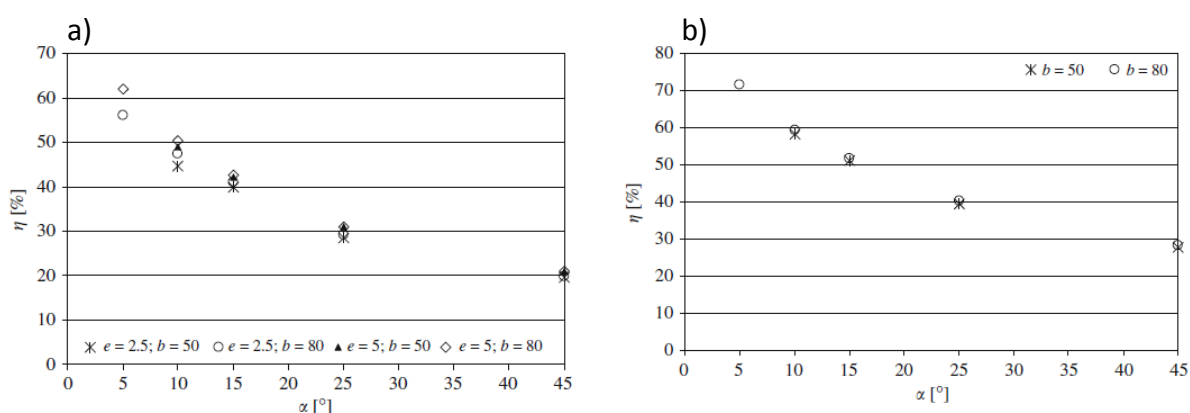


Figura 36 – η em função de α para reparações apenas com reforço exterior (a) e para reparações com reforços em ambas as faces da zona reparada (b) [68].

A Figura 36 (a) e (b) mostra o valor do rendimento da reparação (η) em função de α para reparações apenas com reforço exterior e reparações com reforços em ambas as faces da zona reparada, respetivamente. Pela Figura 36 (a) observa-se um aumento exponencial da resistência da reparação com a redução de α , previamente explicado, e também se observa um aumento da resistência da reparação com o aumento da largura dos aderentes de 50 mm para 80 mm. A variação de e demonstra um grande impacto na resistência da reparação, sendo recomendados valores mais elevados para se obter maior eficiência da reparação. Pela Figura 36 (b) também se evidencia aumento de η com a redução de α . O aumento de η , com a utilização de reforços em ambas as faces da zona reparada, foi substancial e os maiores valores de resistência foram encontrados para valores de α mais reduzidos [68]. Também se pode observar que existe um aumento da resistência da reparação quando se aplicam reforços em ambas as faces em relação a ser aplicado apenas reforço exterior. No passado foi realizado um estudo numérico de reparações por remendo adesivo com o uso de reforços exteriores em substratos de compósito e por uma aproximação 3D [68]. Neste trabalho realiza-se o estudo experimental e numérico de reparações por remendo embebido 2D e com a utilização de reforços em substratos de alumínio.

2.4. Previsão de resistência em ligações adesivas

As primeiras técnicas de previsão de resistência em ligações adesivas originavam estruturas mais pesadas e mais caras, pois as juntas adesivas eram sobredimensionadas por não existirem modelos de materiais e de critérios de rotura adequados. Ao longo dos tempos, foram sendo desenvolvidas metodologias de previsão (analíticas e numéricas). Estes estudos foram iniciados nos anos 30 com o modelo analítico de Volkersen para juntas de sobreposição simples [38], que considerou os materiais como sendo totalmente elásticos e a deformação do adesivo ocorre somente em corte. Porém a formulação analítica das juntas adesivas torna-se mais complexa se o adesivo tiver a capacidade de deformar plasticamente, se forem utilizados aderentes de material compósito ou ainda se forem utilizados aderentes de materiais diferentes. A técnica numérica mais utilizada para juntas adesivas, o Método de Elementos Finitos (MEF), foi pela primeira vez apresentada por Adams e os seus colegas de trabalho [49]. Inicialmente foram estudados por Harris e Adams efeitos como a rotação da

junta, os aderentes, a plasticidade do adesivo e a influência dos filetes [73]. O método apresentado por Harris e Adams para previsão da resistência das juntas adesivas também pode ser utilizado juntamente com critérios da mecânica da fratura, quer pelo fator de intensidade das tensões ou por abordagens energéticas como a técnica do fecho virtual da fenda (TFVF). Esta técnica apresenta uma dificuldade que consiste na necessidade de reconstruir a malha durante a propagação do dano, aumentando consideravelmente o esforço computacional [74]. Desenvolveu-se ainda uma técnica de modelação do dano através da combinação do MEF com elementos coesivos. Esta técnica junta a modelação convencional por MEF para as regiões onde não se espera a ocorrência de dano e a técnica de modelos de dano utiliza-se para simular o crescimento das fendas.

2.4.1. Métodos analíticos

Os primeiros métodos utilizados na análise de estruturas adesivas consistiam em formulações analíticas. Os trabalhos realizados por Volkersen [38] e Goland e Reissner [75], foram os pioneiros de uma série de estudos teóricos que tinham a vantagem da simplicidade para atingir os campos de tensões nas estruturas coladas. Porém estes modelos incluíam muitas simplificações em termos de geometria das estruturas, solicitações e condições fronteira. A resistência da junta colada era prevista por critérios baseados na tensão ou deformação máximas. Nos dias de hoje, e embora os estudos teóricos tenham sido alvo de aperfeiçoamentos em termos de capacidades de modelação, nomeadamente a consideração de não linearidade material [76] ou geométrica [77], estes estudos foram substituídos por análises numéricas.

2.4.2. Métodos numéricos

Neste subcapítulo apresentam-se os métodos numéricos utilizados, de acordo com a sua evolução e desenvolvimento, para a previsão da resistência em ligações adesivas.

O primeiro método a ser apresentado é o da **modelação contínua**. Na mecânica contínua, os valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação, previstos pela análise de MEF, são normalmente utilizados num critério de rotura para estimar a resistência da ligação. Esta técnica apresenta como vantagem a análise expedita das estruturas coladas, com ou sem dano inicial, e sob uma carga arbitrária. No entanto, estes critérios têm uma

grande limitação quando aplicados a juntas adesivas, uma vez que estas são propensas a concentrações de tensões nas extremidades da sobreposição, devido aos entalhes e variações abruptas de geometria. Como resultado, durante uma análise do MEF a uma estrutura colada, as tensões numa zona singular aumentam com o refinamento da malha e não se consegue obter convergência, o que resulta em previsões dependentes do refinamento da malha [78]. Algumas das melhorias que foram introduzidas a estas técnicas ao longo dos anos foram a definição de critérios de rotura baseados em tensões ou deformações mais refinados para diferentes materiais e mecanismos de fratura, ou combinação com modelos contínuos de material mais realistas, mas mesmo assim, sem resolver a dependência da malha.

Outro método apresentado é o da **mecânica da fratura**. A mecânica contínua assume que a estrutura e o seu material são contínuos. A existência de defeitos ou dois materiais com cantos reentrantes, obviamente não se enquadram nesta hipótese. Nas estruturas os defeitos mais comuns são fendas e para as quais foi desenvolvida a mecânica da fratura. Na mecânica da fratura, é bem aceite que as tensões são singulares (infinito) na ponta da fenda e não podem ser calculadas usando a mecânica contínua. Com as atuais teorias na mecânica, existe sempre tal singularidade quando o ângulo da fenda é inferior a 180° . Este resultado foi descoberto por Williams [79] para singularidades de tensão num defeito em cunha. Nos últimos anos em muitos dos problemas da engenharia a mecânica da fratura tem sido aplicada com sucesso. Grande parte dos estudos realizados para juntas adesivas utilizam a taxa de libertação de energia, G , e o respetivo valor crítico ou resistência à fratura, G_c [80], em vez de fatores de intensidade de tensão, porque estes não se conseguem determinar facilmente quando a fenda cresce numa interface ou na sua proximidade. Como a fratura de juntas adesivas ocorre normalmente em modo misto por causa da complexidade do estado de tensão e do efeito dos substratos, podem ser desenvolvidos os critérios de rotura na fratura em modo misto de maneira idêntica aos critérios de rotura clássicos, embora deva ser introduzido o conceito da superfície de fratura.

A **mecânica do dano** é outro método numérico para previsão da resistência de ligações adesivas. As técnicas de modelação avançadas, que são muito utilizadas atualmente, garantem previsões precisas de rotura e permitem superar as limitações dos métodos que

foram descritos anteriormente. A simulação por MEF baseia-se na utilização de elementos sólidos contínuos e prevê de forma errada que os elementos sofrem plasticidade generalizada sem evolução do dano, enquanto os modelos da mecânica do dano podem induzir dano nos elementos pela redução dos esforços transmitidos. Como resultado, torna-se possível a simulação gradual do dano e da fratura de uma fenda com trajetória pré-definida ou arbitrária dentro de uma região finita [81]. As técnicas de modelação de dano podem ser de dois tipos, locais ou contínuas. Na modelação do dano local, o dano ocorre numa linha ou numa superfície (análise 2D ou 3D, respetivamente), em que se simula uma rotura interfacial entre dois materiais, por exemplo entre a ligação adesiva e aderente, a fratura interlaminar de um laminado compósito ou da interface entre as fases sólidas de materiais. Na modelação contínua, o dano estende-se ao longo uma área ou volume (análise 2D ou 3D, respetivamente), para simular uma rotura num material em bruto ou para modelar uma fratura coesiva do adesivo.

Outro método numérico apresentado são os **modelos de dano coesivos**. Há algumas décadas atrás, com a implementação em computador de métodos baseados na Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) obteve-se um grande sucesso, mas estes eram limitados a comportamentos elásticos na proximidade da fenda. Atualmente os adesivos de elevada tenacidade desenvolvem zonas plásticas que podem ser maiores do que a espessura dos aderentes. Os Modelos de Dano Coesivos (MDC) foram desenvolvidos no final da década de 50 por Barenblatt [82] para se tornar possível descrever o dano na zona do processo da fratura na frente da fenda sob efeito de cargas estáticas, dando o primeiro passo para métodos mais refinados para avaliar eventuais danos em estruturas. Estes métodos MDC foram amplamente testados desde então para simular o início e a propagação de dano em problemas de rotura coesiva, interfacial ou delaminações em compósitos. Os MDC podem ser baseados em elementos de mola ou coesivos [83], e podem ser facilmente incorporados numa análise convencional por MEF para modelar a fratura em vários materiais, incluindo juntas adesivas [84].

Ainda existem mais alguns métodos mas que são pouco utilizados como por exemplo os **modelos alternativos aos modelos do dano coesivos** ([85 a 88]), e o **método de elementos finitos estendido** (MEFX) ([89 a 93]). Como estes métodos são pouco utilizados também não vão ser mais aprofundados e ficam só algumas referências de trabalhos nos quais foram utilizados estes métodos.

3. Trabalho Experimental

Neste capítulo, inicialmente será feita uma descrição dos materiais selecionados para substratos, remendos, reforços e para o adesivo, indicando também as suas propriedades. De seguida indicar-se-ão as várias dimensões, geometrias e configurações das reparações 2D, utilizadas para a realização deste trabalho. Serão depois enunciadas todas as etapas utilizadas para o fabrico dos provetes, como por exemplo o processo de maquinagem dos substratos e colagem dos provetes para ensaio. Ainda neste capítulo indica-se as condições de ensaio utilizadas para a realização dos ensaios de tração. Para terminar, apresenta-se os resultados obtidos experimentalmente, sendo estes resultados apresentados e comentados com o auxílio das curvas $P-\delta$, pelas superfícies de rotura e pelos gráficos das forças máximas. No trabalho experimental efetua-se a comparação do aumento da resistência das reparações com a utilização de reforços exteriores ou reforços exteriores e interiores. A discussão detalhada dos resultados obtidos será feita no capítulo 4, após estudo de análise de tensões nas reparações, nomeadamente nas camadas de adesivo que as compõem, que permitirá explicar em detalhe os comportamentos obtidos.

3.1. Materiais

Nesta secção são descritos os materiais utilizados bem como as suas propriedades.

3.1.1. Substratos, remendos e reforços

O material escolhido para os substratos, remendos e reforços foi a liga de alumínio AW6082 T651, devido à sua ampla utilização na Europa sob diversas aplicações estruturais sob diferentes formas extrudidas. Para os substratos e remendos foi utilizada uma chapa com a espessura de 3 mm, enquanto para os reforços foi utilizada uma chapa com espessura de 1 mm.

Os resultados de tensão-deformação ($\sigma - \varepsilon$) da liga de alumínio AW6082 T651, obtidos de acordo com a norma ASTM-E8M-04 são apresentados na Figura 37 [94]. Apresenta-se também a aproximação que será utilizada na análise numérica, em que se considera para efeitos de simplificação um comportamento elástico-perfeitamente plástico. A liga de alumínio selecionada para os substratos e remendo é uma liga de resistência média, apresenta-se como sendo a liga com a maior resistência da série 6000 e uma excelente resistência à corrosão. Esta liga apresenta um módulo de Young (E) de $70,07 \pm 0,83$ GPa, uma tensão de cedência (σ_{ced}) de $261,67 \pm 7,65$ MPa, uma tensão de rotura (σ_f) de $324 \pm 0,16$ MPa e uma deformação de rotura (ε_f) de $21,70 \pm 4,24$ %. Na ficha do fabricante (ver Anexo A [95] e Tabela 3) esta liga apresenta uma elevada resistência à tração, 340 MPa, obtida por envelhecimento artificial, a uma temperatura de aproximadamente 180 °C.

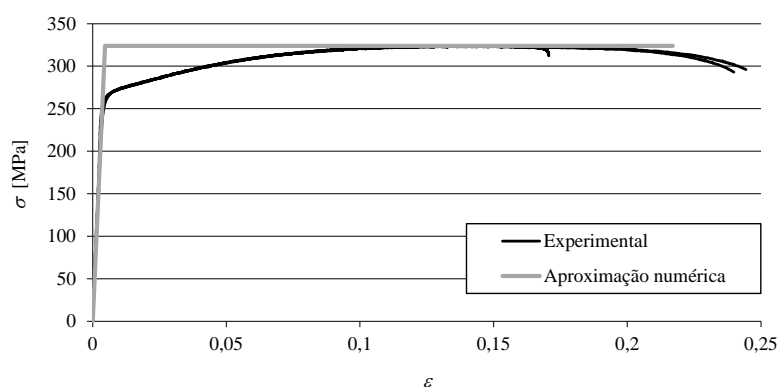


Figura 37 – Curva ($\sigma - \varepsilon$) da liga de alumínio AW6082 T651 e respetiva aproximação numérica para análise através dos elementos finitos [94].

Na Tabela 3 são apresentadas as propriedades mecânicas mais relevantes da liga de alumínio AW6082 T651, no Anexo A [95] apresenta-se a ficha técnica fornecida pelo fabricante.

Tabela 3 – Propriedades Mecânicas da Liga AW6082 T651.

| Propriedades | Liga de alumínio AW6082 T651 |
|--|------------------------------|
| Módulo de Young, E [GPa] | $70,07 \pm 0,83$ |
| Coefficiente de Poisson ν^* | 0,3 |
| Tensão de Cedência, σ_{ced} [MPa] | $261,67 \pm 7,65$ |
| Tensão de Ruptura, σ_r [MPa] | $324,00 \pm 0,16$ |
| Deformação de Ruptura, ϵ_r [%] | $21,70 \pm 4,24$ |
| Dureza Vickers* [HV] | 100 |

* Dados do fabricante

3.1.2. Adesivos

Neste ponto são descritos os adesivos utilizados neste trabalho e as suas propriedades mecânicas mais relevantes para a análise das reparações. Para o estudo experimental, o adesivo escolhido foi o Araldite® e para o estudo numérico foram escolhidos dois adesivos o Araldite® 2015 e o Araldite® AV138. Utilizou-se estes adesivos para o trabalho numérico para ser possível efectuar uma comparação entre os dois na capacidade de restituição da resistência das placas de alumínio e por se tratarem: de um adesivo dúctil, Araldite® 2015, e de um adesivo frágil, Araldite® AV138. No Anexo B apresenta-se a ficha técnica do fabricante para o adesivo Araldite® 2015 [96] e no Anexo C apresenta-se a ficha técnica para o adesivo Araldite® AV138 [97].

Para o trabalho experimental somente foi utilizado o adesivo Araldite® 2015, que posteriormente vai permitir aferir a precisão do método numérico utilizado na previsão da resistência. Após esta verificação, no trabalho numérico são utilizados os dois adesivos. Aproveita-se este capítulo e caracterizam-se ambos os adesivos para a entrada posterior na análise dos Elementos Finitos onde se fará a comparação com os resultados experimentais. A Figura 38 serve como indicação, para mostrar as curvas típicas de σ - δ no modo I puro dos adesivos Araldite® AV138 (a) e Araldite® 2015 (b). A diferença entre os dois adesivos no que

se refere à ductilidade é evidente, uma vez que o adesivo Araldite® 2015 tem uma zona de plastificação antes da rotura, enquanto para o adesivo Araldite® AV138 é frágil. No adesivo Araldite® AV138 também foi encontrado um maior desvio entre os espécimes pois devido à sua fragilidade este adesivo é mais sensível a defeitos de fabrico [94]. A tensão de rotura do adesivo Araldite® AV138 é quase o dobro da do adesivo Araldite® 2015. A Tabela 4 resume os dados recolhidos sobre os adesivos e estes dados serão posteriormente utilizados para as simulações de Elementos Finitos (EF) e previsões de força máxima. A tensão de cedência inicial foi calculada para uma deformação plástica de 0,2 % para ambos os adesivos [94].

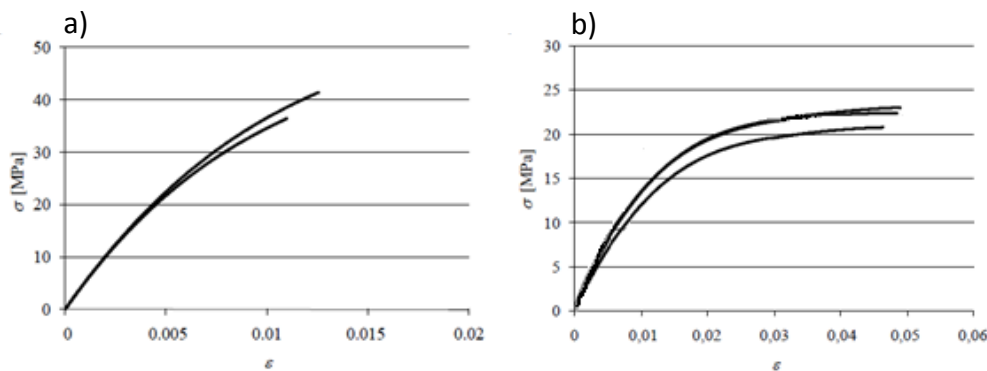


Figura 38 – Curvas σ - ε para os adesivos Araldite® AV138 (a) e Araldite® 2015 (b) [94].

Tabela 4 – Propriedades mecânicas dos adesivos Araldite® 2015 e Araldite® AV138 [94].

| Propriedades | Araldite® 2015 | Araldite® AV 138 |
|---|------------------|------------------|
| Módulo de Young, E [GPa] | $1,85 \pm 0,21$ | $4,89 \pm 0,81$ |
| Coefficiente de Poisson ν * | 0,33 | 0,35 |
| Tensão de Cedência, σ_{ced} [MPa] | $12,63 \pm 0,61$ | $36,49 \pm 2,47$ |
| Tensão de Rotura, σ_f [MPa] | $21,63 \pm 1,61$ | $39,45 \pm 3,18$ |
| Deformação de Rotura, ε_f [%] | $4,77 \pm 0,15$ | $1,21 \pm 0,10$ |
| Módulo de corte, G [GPa] | $0,56 \pm 0,21$ | $1,56 \pm 0,01$ |
| Tensão de Cedência ao Corte, τ_{ced} [MPa] | $14,60 \pm 1,30$ | $25,10 \pm 0,33$ |
| Tensão de Rotura ao Corte, τ_f [MPa] | $17,90 \pm 1,80$ | $30,20 \pm 0,40$ |
| Deformação de Rotura ao Corte, γ_f [%] | $43,90 \pm 3,40$ | $7,80 \pm 0,70$ |

* Dados do fabricante

3.2. Reparações 2D

Nesta secção do relatório descrevem-se as geometrias das reparações e o seu procedimento de fabrico.

3.2.1. Dimensões e geometria

A geometria 2D dos provetes para reparações por remendo embebido com a utilização de reforço exterior é apresentada na Figura 39 e corresponde à condição 1, a geometria 2D dos provetes para reparações por remendo embebido com a utilização de reforço exterior e interior é apresentada na Figura 40 e corresponde à condição 2. As dimensões características do provete para as reparações 2D são, comprimento do provete (a), comprimento de sobreposição do reforço exterior (c), comprimento do remendo na secção interior da reparação (d), espessura da camada de adesivo do remendo (t_A), espessura da camada de adesivo dos reforços (t_B), espessura dos substratos (t_p), espessura dos reforços (t_q), ângulo da reparação (α) e largura da reparação e remendo (b). O comprimento do remendo na secção interior da reparação (d) e o comprimento de sobreposição do remendo exterior (c) ficaram definidos como um valor fixo. Foram testadas reparações com 5 ângulos de *scarf* (α) diferentes para as duas condições, totalizando 10 configurações de reparação. Os resultados experimentais aqui apresentados para condição de sem reforço foram obtidos de um trabalho realizado anteriormente [98]. As dimensões utilizadas para as reparações são apresentadas na Tabela 5. Na Tabela 6 são apresentados os comprimentos totais dos reforços, considerando que c após o final do remendo é um valor fixo de 5mm, o comprimento do reforço interior é igual ao comprimento do reforço exterior.

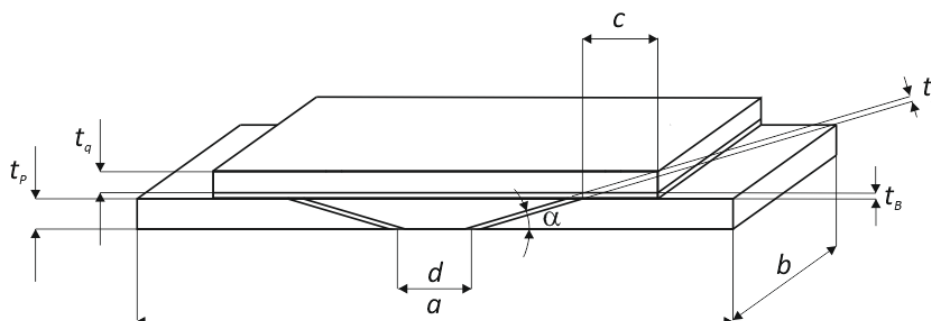


Figura 39 – Configuração da reparação com reforço exterior (condição 1).

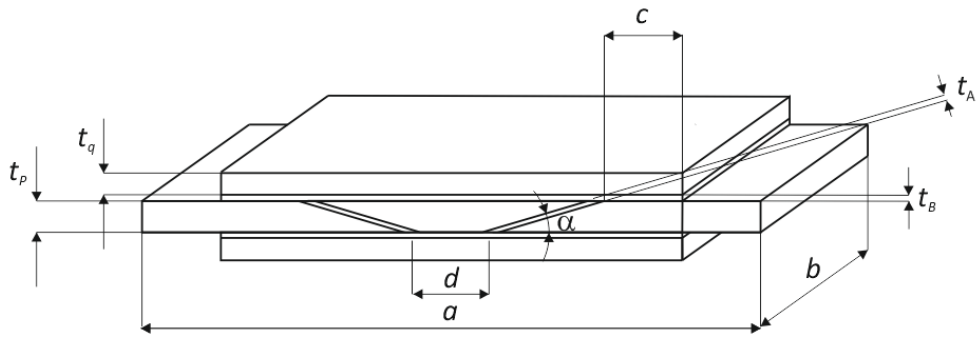


Figura 40 – Configuração da reparação com reforço exterior e interior (condição 2).

Tabela 5 – Dimensões e geometria dos provetes.

| Designação | Dimensão |
|---|---------------------|
| Comprimento do provete a [mm] | 200 |
| Comprimento de sobreposição do reforço exterior c [mm] | 5 |
| Comprimento do remendo na secção interior da reparação d [mm] | 10 |
| Espessura da camada de adesivo do remendo t_A [mm] | 0,2 |
| Espessura da camada de adesivo dos reforços t_B [mm] | 0,2 |
| Espessura dos substratos t_p [mm] | 3 |
| Espessura dos reforços t_q [mm] | 1 |
| Ângulo do remendo α [°] | 10, 15, 20, 30 e 45 |
| Largura da reparação e reforço b [mm] | 25 |

Tabela 6 – Comprimento de reforço de acordo com o ângulo α do remendo.

| Ângulo do remendo α [°] | Comprimento do reforço [mm] |
|--------------------------------|-----------------------------|
| 10 | 56,24 |
| 15 | 43,86 |
| 20 | 37,62 |
| 30 | 31,10 |
| 45 | 26,50 |

3.2.2. Preparação dos substratos, reforços e remendos

Neste ponto será descrito todo o procedimento para a preparação dos substratos, dos reforços e dos remendos. De modo a rentabilizar alguns recursos, foram reciclados os substratos e remendos de um trabalho anterior [98], à exceção daqueles com $\alpha=10^\circ$, pois estes apresentavam deformação plástica. Os reforços foram fabricados de raiz, a partir de uma chapa com espessura de 1 mm de liga de alumínio igual à utilizada para os substratos e remendos, inicialmente cortou-se numa guilhotina “Adira” modelo GM/0410 várias barras com largura igual à da reparação e de seguida cortou-se esses segmentos com os comprimentos de reforço necessários para cada geometria de reparação em análise (ver Tabela 6). Para a reciclagem dos substratos e remendos, foi necessário remover o adesivo dos provetes, e para tal recorreu-se a um forno de convecção “Nabertherm” modelo N11/H (Figura 41) presente nos laboratórios de fundição do ISEP para aquecimento dos mesmos a uma temperatura a rondar os 130°C e durante cerca de 1 hora. Depois do adesivo ser degradado, efetuou-se a separação da ligação entre o remendo e os substratos. Para se remover o adesivo existente nos substratos e remendos, utilizou-se outro substrato e por fricção entre os dois conseguiu-se remover a maior quantidade de adesivo, o restante adesivo foi removido através de granalhagem dos remendos e substratos.



Figura 41 – Forno da Nabertherm.

Para as reparações com $\alpha=10^\circ$ foi necessário maquinar novos provetes e remendos. Para o fabrico de cada provete são necessários dois substratos e um remendo. Os substratos foram obtidos a partir de barras de alumínio com cerca de 90 mm de comprimento, 25 mm de largura e 3 mm de espessura. Uma das extremidades dos substratos foi maquinada numa

fresadora (ver Figura 42 – (a)), para obter a rampa com inclinação igual a 10° . Para fazer os remendos foram cortadas placas com a mesma largura e espessura mas com um comprimento de 46 mm que posteriormente foram fresadas de ambos os lados para obter as rampas com o mesmo valor de inclinação. As rampas dos remendos e substratos foram realizados nas oficinas do ISEP, através de uma fresadora Gambin^{SA} modelo 1m que trabalhou com um avanço de 10 mm/min., a uma velocidade de rotação de 1120 rot./min. e com o uso de uma fresa Dormer S142 Alu. S.D.S Carbide 12.00K10 Micrograin. Para garantir o ângulo desejado e para fixar o substrato ou remendo utilizou-se uma prensa sobre a mesa da fresadora (ver Figura 42 – (b)).

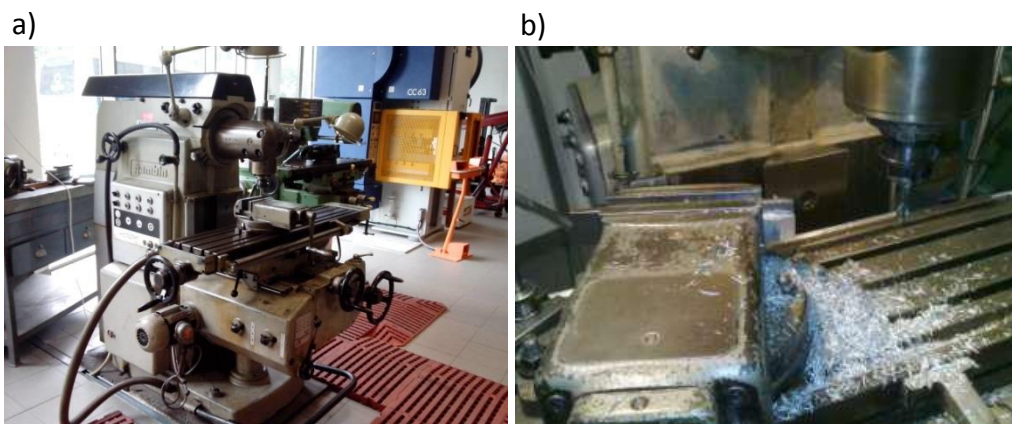


Figura 42 – Fresadora “Gambin” (a), processo de fresagem das rampas (b).

Para execução dos reforços utilizou-se a guilhotina da “Adira” das oficinas mecânicas do ISEP para cortar a chapa de alumínio com as dimensões necessárias (Figura 43).



Figura 43 – Guilhotina da “Adira”.

3.2.3. Fabrico dos provetes

Depois de removido o adesivo, da maquinagem de novos substratos e do corte dos reforços, procedeu-se à granalhagem dos mesmos. Os substratos, remendos e reforços foram granalhados numa granalhadora “Cidblast” modelo RT6S com granalha de alumina e este procedimento foi realizado nos laboratórios de ensaios mecânicos do ISEP (Figura 44). De seguida procedeu-se à limpeza com acetona, que é um processo passivo químico e que tem como objetivo o desengorduramento da superfície, a remoção de poeiras, óleos, humidades e de camadas frágeis de óxidos que podem estar presentes nas superfícies, este processo é de extrema importância e deve ser realizado com o devido cuidado pois deste modo garante-se uma melhor superfície com boas características de molhabilidade que permite uma maior área de contato entre aderentes e adesivo [99]. Apresenta-se também o aspeto final dos substratos e remendos após a granalhagem e a limpeza (Figura 45).



Figura 44 – Granalhadora “Cidblast”.



Figura 45 – Aspeto final dos substratos e remendo após tratamento da superfície.

Após a limpeza dos provetes realiza-se a colagem dos remendos. Em primeiro lugar posiciona-se os substratos e remendos nas bases de madeira que vão servir de apoios para a colagem dos remendos (Figura 46 – (a)). De modo a garantir um valor de t_A de 0,2 mm recorreu-se ao uso de fios de pesca, com diâmetro igual a espessura pretendida, entre os substratos e o local onde serão colocados os remendos (Figura 46 – (b)). Estando este procedimento realizado de seguida

efetua-se a colagem. Para a colagem e aplicação do adesivo Araldite® 2015 recorreu-se ao uso de uma pistola com bico de mistura do adesivo bi-componente.

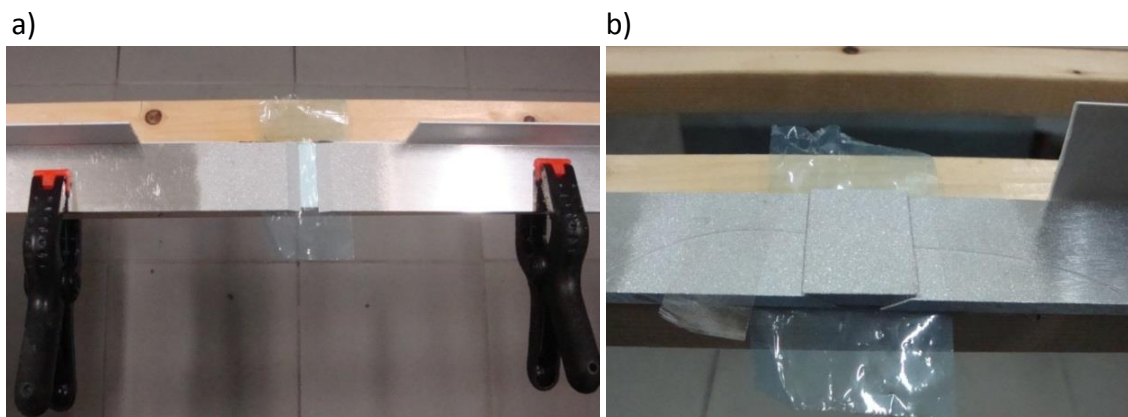


Figura 46 – Colocação dos substratos nas régua de madeira (a), e aplicação de fio de pesca para garantir $t_A=0,2$ mm (b).

Depois de efetuada a colagem dos remendos aguardou-se alguns dias para garantir que o adesivo se encontrava devidamente curado. Para se garantir que t_A não se altera durante o processo de cura, aplicou-se molas para ser exercida pressão sobre os remendos e deste modo também se evitou que os remendos fossem deslocados (Figura 47).



Figura 47 – Aplicação de molas para exercer pressão sobre os remendos.

Após o adesivo estar curado é necessário remover o excedente de adesivo que ficou nos substratos e realiza-se este processo por ser necessário obter superfícies sem irregularidades para depois ser possível a colagem dos reforços. A remoção do excedente de adesivo foi efetuada recorrendo-se ao uso de uma mó e da furadora da “FFI Máquinas” modelo FB3^c (Figura 48 – (a)). Apresenta-se também o aspeto final de um provete com o excedente de adesivo removido e sem a aplicação de reforços (Figura 48 – (b)).

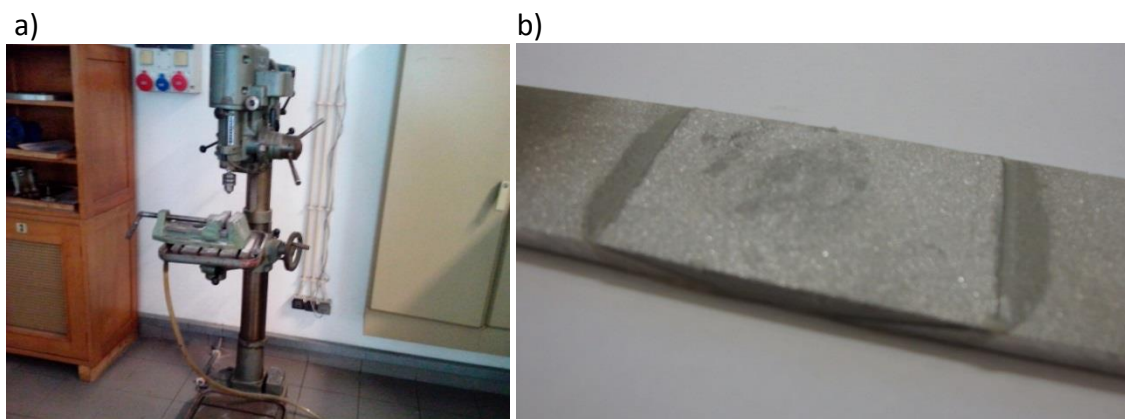


Figura 48 – Furadora “FFI Máquinas” utilizado para a remoção de excedente de adesivo (a), e aspeto final da reparação após remoção do excedente de adesivo e sem a aplicação de reforços (b).

Após a remoção do adesivo, é necessário repetir o procedimento de granalhagem e de limpeza com acetona antes da colagem dos reforços, de modo a remover adesivo que não tenha sido retirado pela mó e para desengordurar e remover poeiras, óleos, humidades e de camadas frágeis de óxidos que podem estar presentes nas superfícies da superfície de colagem dos reforços exteriores e interiores [99].

Após repetição do procedimento acima descrito, deu-se início à colagem dos reforços. Para tal fixa-se os provetes às bases de madeira com molas (Figura 49 – (a)), e de modo a garantir um t_A de 0,2 mm, utiliza-se novamente fio de pesca com diâmetro igual à espessura pretendida e que será fixado aos provetes com fita-cola (Figura 49 – (b)).

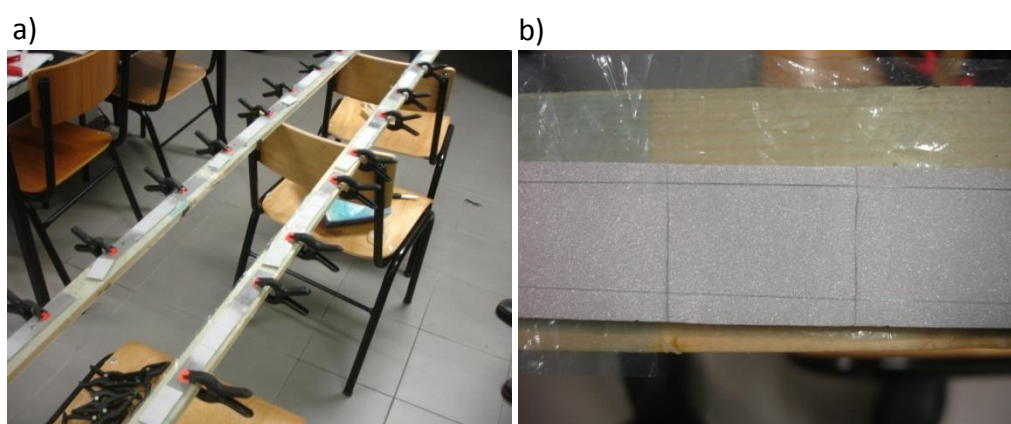


Figura 49 – Fixação dos provetes nas régua de madeira (a), e aplicação dos fios de pesca para garantir um t_A de 0,2 mm (b).

De seguida aplica-se o adesivo necessário para a colagem dos reforços. Este procedimento foi realizado em duas etapas. Primeiro colou-se os reforços exteriores em todos os provetes da condição1 (Figura 50 – (a) e (b)). Depois colou-se em simultâneo tanto os reforços exteriores como interiores para todos os provetes da condição 2 (Figura 51).

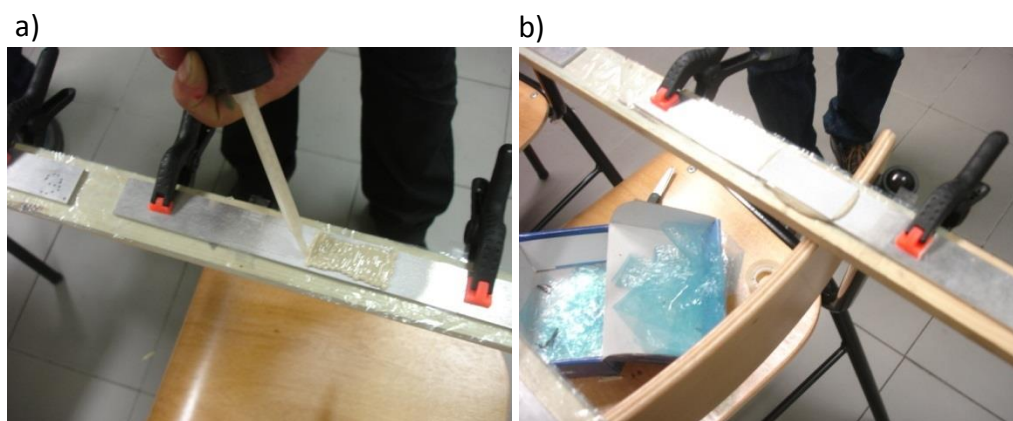


Figura 50 – Aplicação do adesivo para colagem dos reforços (a) e aplicação dos reforços (b).

Por fim, e após o adesivo estar curado, é necessário retirar novamente o excedente de adesivo para obter-se uma geometria sem excesso de adesivo e idêntica aos modelos numéricos. Na Figura 51 apresenta-se uma reparação com aplicação dos reforços e com um calço de madeira a ser pressionado na reparação por uma mola. Utiliza-se esta metodologia para se obter uma melhor distribuição de pressão sobre a superfície dos reforços e para garantir um t_A de 0,2 mm.



Figura 51 – Reparação com a aplicação em simultâneo de reforço exterior e interior.

Depois de decorrido o tempo necessário para a cura do adesivo remove-se novamente o excedente de adesivo da reparação e de seguida realizam-se os ensaios de tração dos substratos.

3.3. Condições de ensaio

Todos os provetes foram tracionados até à rotura, obtendo-se as curvas força-deslocamento ($P-\delta$) e os modos de rotura. Os ensaios de tração foram realizados numa máquina Shimadzu – Autograph AG-X com uma célula de carga de 100 kN (Figura 52–(a)). As condições de ensaio foram as seguintes:

- Temperatura: ambiente (aproximadamente 18 °C);
- Humidade relativa de 40 %;
- Velocidade de ensaio: 1 mm/min;
- Distância entre maxilas: 220 mm.

Foram realizados 5 ensaios para cada configuração de reparação considerada.

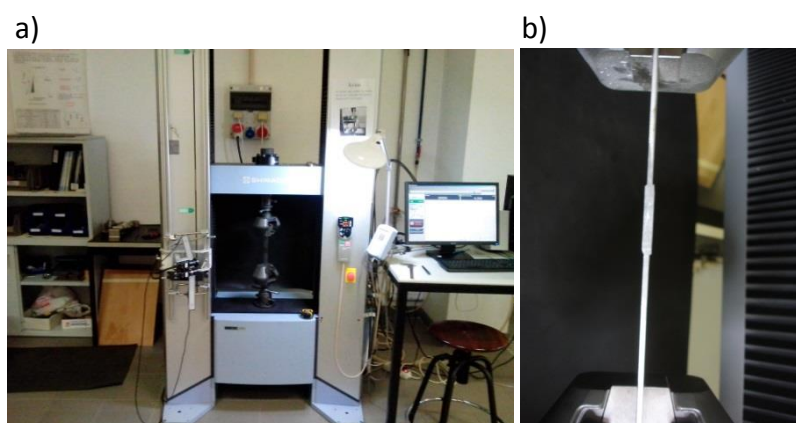


Figura 52 – Máquina de ensaio de tração Shimadzu – Autograph AG-X (a) e provete a ser ensaiado (b).

3.4. Resultados e comentários das juntas 2D

Neste ponto apresenta-se os modos de rotura, as curvas $P-\delta$, os gráficos com os valores de $P_{\text{máx}}$ para a condição 1 correspondente a reparações 2D utilizando o adesivo Araldite® 2015 e reforço exterior de $c=5$ mm, e para a condição 2, idêntica à anterior, mas com reforço exterior e interior. No final apresentam-se uma comparação de resultados entre a condição 1 e a condição 2. Só se apresenta os resultados para $\alpha=10^\circ$ e 45° sendo remetidos para o Apêndice 1 os modos de rotura e para o Apêndice 2 as curvas $P-\delta$, para os restantes ângulos estudados.

3.4.1. Modos de rotura

Neste subcapítulo apresenta-se os modos de rotura após a realização do ensaio de tração. Em primeiro lugar apresentam-se os modos de rotura para reparações com $\alpha=10^\circ$ com a condição 1 e condição 2, de seguida apresenta-se os modos de rotura para reparações com $\alpha=45^\circ$ para ambas as condições de ensaio. Na Figura 53 apresenta-se os substratos após a realização do ensaio de tração para reparações com $\alpha=10^\circ$ e para a condição 1 (a) e para a condição 2 (b). Na Figura 54 (a) e (b) apresenta-se a vista de perfil das reparações com $\alpha=10^\circ$ para ambas as condições após a realização do ensaio de tração.

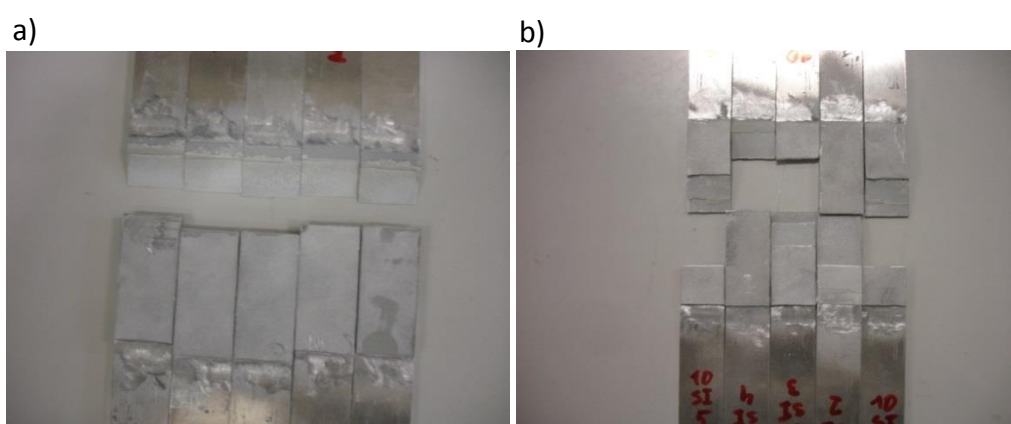


Figura 53 – Provetes de $\alpha=10^\circ$ condição 1 (a), e condição 2 (b), após a realização do ensaio de tração.

Pela Figura 53 (a) observa-se que a rotura foi coesiva pois se verifica a existência de adesivo nas duas superfícies dos aderentes e do remendo também se verifica que houve deformação plástica dos reforços, ver Figura 54 (a). Na Figura 53 (b) observa-se que a rotura foi coesiva e que houve deformação plástica dos reforços e em dois dos ensaios até houve rotura dos reforços, ver Figura 54 (b).

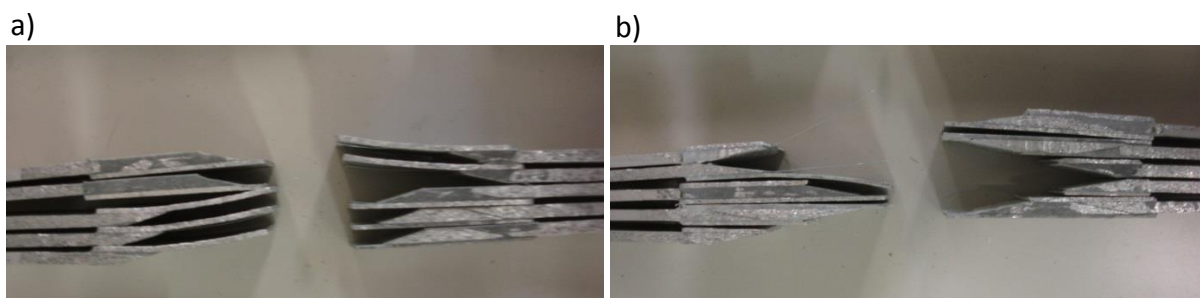


Figura 54 – Vista de perfil de provetes de $\alpha=10^\circ$ condição 1 (a), e condição 2 (b), após a realização do ensaio de tração.

Na Figura 55 apresenta-se os substratos após a realização do ensaio de tração da condição 1 (a) e da condição 2 (b) para reparações com $\alpha=45^\circ$. Apresenta-se na Figura 56 (a) e (b) a vista de perfil das reparações com $\alpha=45^\circ$ para ambas as condições após a realização do ensaio de tração.

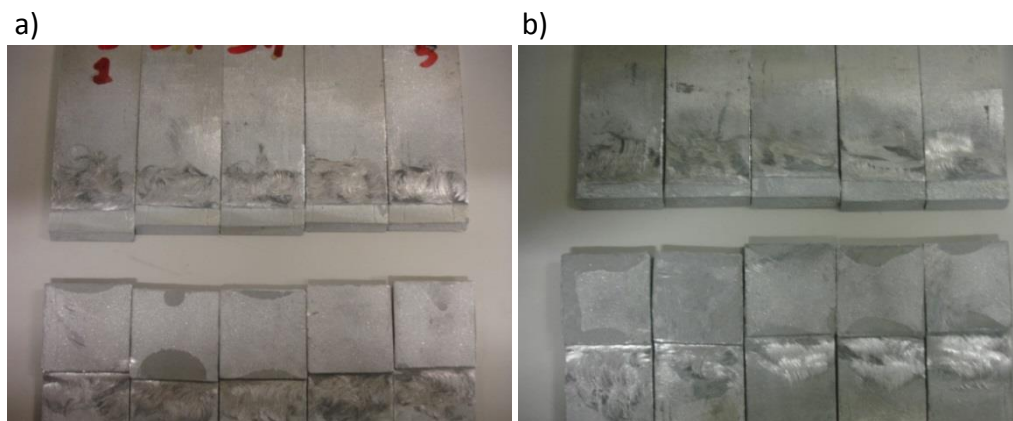


Figura 55 – Provetes de $\alpha=45^\circ$ condição 1 (a) e condição 2 (b), após a realização do ensaio de tração.

Pela Figura 55 (a) e (b) observa-se que a rotura foi coesiva pois se verifica a existência de adesivo nas duas superfícies dos aderentes e do remendo. Observa-se pela Figura 56 (a) e (b) que não existe deformação plástica dos reforços ao contrário do que se observou para as reparações com $\alpha=10^\circ$. Os restantes modos de rotura para reparações com $\alpha=15^\circ$, 20° e 30° apresentam-se no Apêndice 1. Durante os ensaios não foi possível identificar-se por onde se iniciava a rotura da reparação, pois era praticamente em simultâneo pelo remendo e pelos reforços.

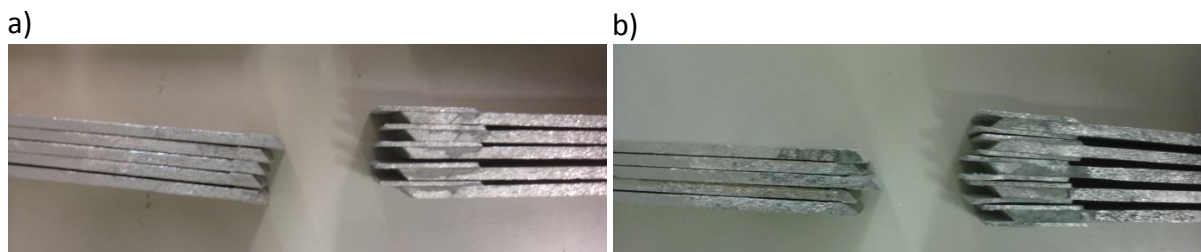


Figura 56 – Vista de perfil de provetes de $\alpha=45^\circ$ condição 1 (a), e condição 2 (b), após a realização do ensaio de tração.

3.4.2. Curvas $P-\delta$

Na Figura 57 apresentam-se as curvas $P-\delta$ para reparações com $\alpha=10^\circ$ com a condição 1 (a) e com a condição 2 (b). Pela Figura 57 (a) e (b) observa-se que existe um aumento de cerca de 60 % de $P_{\text{máx}}$ para a condição 2 comparativamente à condição 1.

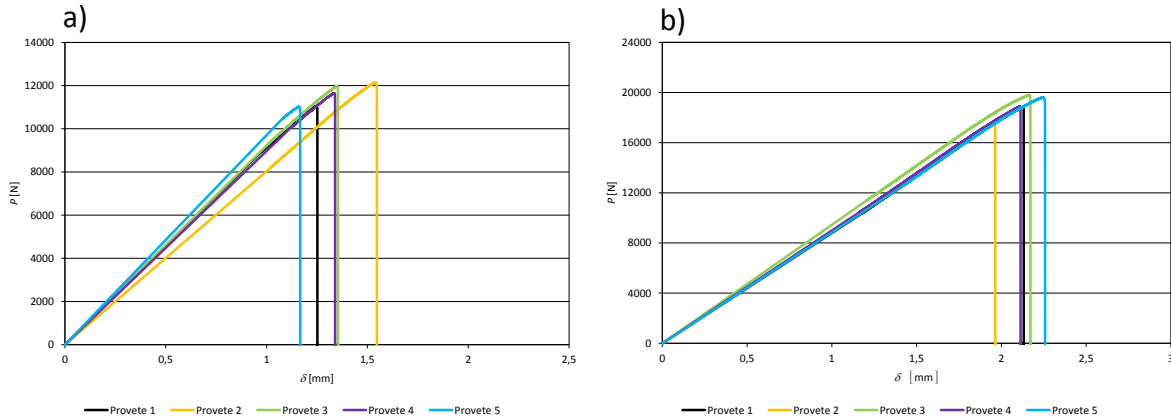


Figura 57 – Curvas $P-\delta$ experimentais para $\alpha=10^\circ$ condição 1 (a), e condição 2 (b).

Apresentam-se na Figura 58 as curvas $P-\delta$ para reparações com $\alpha=45^\circ$ com a condição 1 (a) e com a condição 2 (b). Na Figura 58 (a) e (b) observa-se um aumento de $P_{\text{máx}}$ na ordem dos 145 % para a condição 2 quando comparado com a condição 1. Pela Figura 58 (a) e para os provetes 1, 2, 4 e 5 observa-se um segundo patamar de resistência das reparações, mas de menor valor que $P_{\text{máx}}$. Este patamar de resistência ocorre porque primeiro existe a rotura da camada de adesivo do remendo e só de seguida é que existe a rotura da camada de adesivo do reforço. O valor a considerar-se para efeitos de estudo e análise é o valor máximo de resistência atingido pela reparação na sua globalidade.

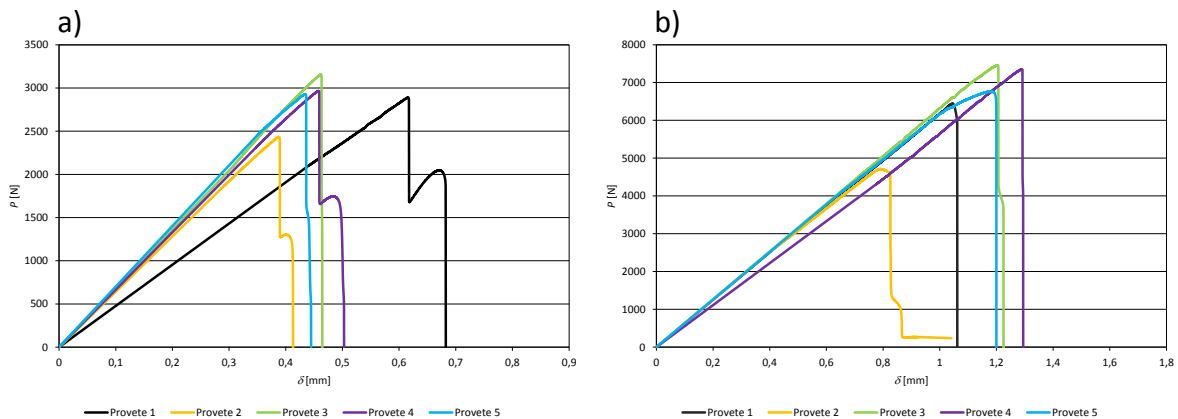


Figura 58 – Curvas $P-\delta$ experimentais para $\alpha=45^\circ$ condição 1 (a), e condição 2 (b).

3.4.3. Resistência das reparações

Na Figura 59 apresenta-se um gráfico com os valores médios de $P_{\text{máx}}$ e os seus respetivos desvios padrões para as condições 1 e 2, ambas com $c=5$ mm. Os resultados experimentais aqui apresentados para reparações sem reforços foram obtidos de um trabalho realizado anteriormente [98].

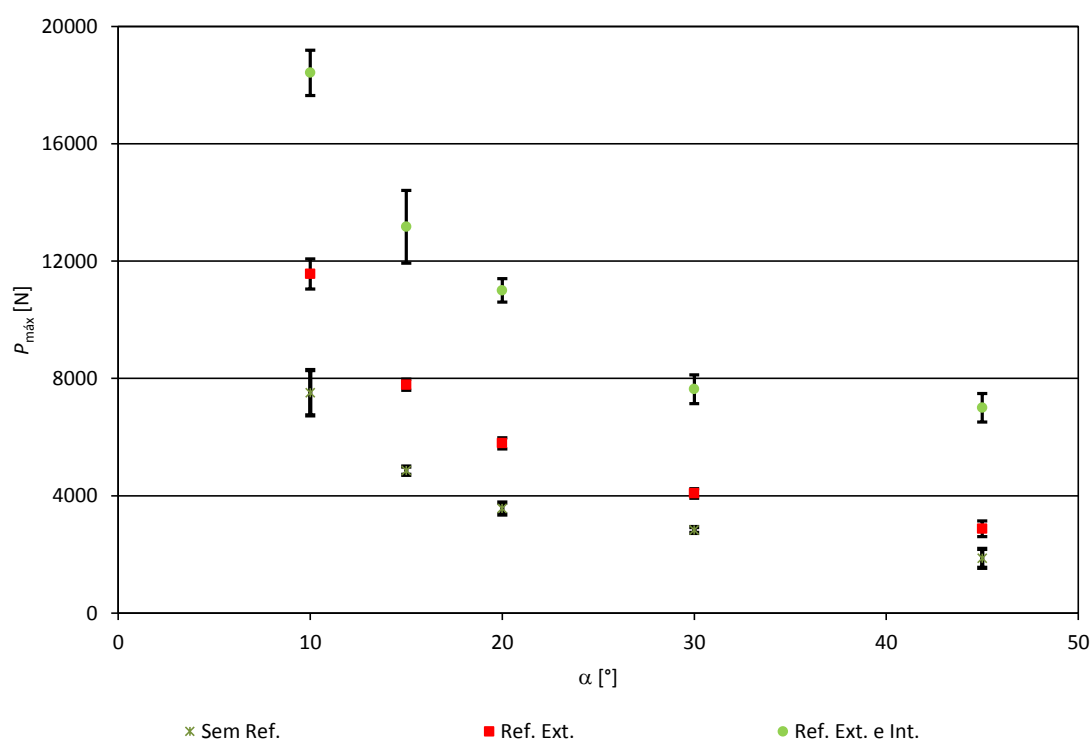


Figura 59 – Gráfico de $P_{\text{máx}}$ e desvio padrão por cada α em análise.

Pela Figura 59 pode-se concluir que houve um aumento de resistência significativo para a condição 1 e ainda um aumento mais significativo para a condição 2. Nota-se também um aumento exponencial da resistência com a diminuição do valor de α . Observa-se na Figura 59 que existe um rendimento da reparação na ordem dos 300 % pela diminuição de $\alpha=45^\circ$ para 10° para a condição 1. Isto deve-se ao aumento da área da colagem. Para a condição 2 pela Figura 59 observa-se que existe um rendimento da reparação na ordem dos 200 % com a diminuição de α . Para $\alpha=45^\circ$ e condição 2, houve um rendimento na ordem dos 150 % em relação à condição 1. Enquanto para $\alpha=10^\circ$ e condição 2, houve um aumento na ordem dos 150 % comparativamente à condição 1. Na Tabela 7 apresentam-se os valores de $P_{\text{máx}}$ para todos os α e correspondentes condições, apresentam-se também os rendimentos da reparação (η) com a aplicação dos reforços.

Tabela 7 – Valores de $P_{\text{máx}}$ e rendimento da reparação por configuração e por α .

| Ângulo remendo α [°] | Configuração | Resistência $P_{\text{máx}}$ [N] | Rendimento da reparação η [%] |
|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 10 | Sem Reforço | 7509,33 \pm 772,05 | 100 % |
| | Reforço Exterior | 11561,26 \pm 514,42 | 154 % |
| | Reforço Exterior e Interior | 18416,65 \pm 774,75 | 245 % |
| 15 | Sem Reforço | 4857,96 \pm 141,93 | 100 % |
| | Reforço Exterior | 7784,93 \pm 193,38 | 160 % |
| | Reforço Exterior e Interior | 13167,04 \pm 1239,07 | 271 % |
| 20 | Sem Reforço | 3567,00 \pm 205,56 | 100 % |
| | Reforço Exterior | 5788,89 \pm 191,50 | 162 % |
| | Reforço Exterior e Interior | 10999,36 \pm 398,79 | 308 % |
| 30 | Sem Reforço | 2831,70 \pm 101,03 | 100 % |
| | Reforço Exterior | 4080,92 \pm 165,20 | 144 % |
| | Reforço Exterior e Interior | 7635,37 \pm 490,90 | 270 % |
| 45 | Sem Reforço | 1867,56 \pm 325,56 | 100 % |
| | Reforço Exterior | 2875,02 \pm 267,01 | 154 % |
| | Reforço Exterior e Interior | 7002,39 \pm 484,17 | 375 % |

De acordo com a Tabela 7, para reparações só com reforço exterior, houve um rendimento da reparação na ordem dos 150 % em relação às reparações sem reforço que representam um rendimento de 100 %. Para as reparações com reforço exterior e interior houve um rendimento da reparação entre os 245 % para $\alpha=10^\circ$ e os 375 % para $\alpha=45^\circ$. Para reparações com $\alpha=10^\circ$ e condição 1 o valor de $P_{\text{máx}}$ obtido foi 11561,26 \pm 514,42 N e para a condição 2 o valor de $P_{\text{máx}}$ obtido foi 18416,65 \pm 774,05 N. Para reparações com $\alpha=45^\circ$ e condição 1 o valor de $P_{\text{máx}}$ obtido foi 2875,02 \pm 267,01 N e para a condição 2 o valor de $P_{\text{máx}}$ obtido foi 7002,39 \pm 484,17 N.

4. Trabalho Numérico

Para o trabalho numérico foram usados os dois adesivos, o Araldite® 2015 e o Araldite® AV138, cujas propriedades já foram apresentadas no capítulo anterior. Este capítulo encontra-se dividido em seis partes. Inicialmente apresentam-se as condições da análise numérica. De seguida enunciam-se os modelos de dano coesivo dando mais ênfase ao modelo de dano triangular, utilizado neste trabalho. No ponto seguinte é efetuada a análise das tensões de arrancamento σ_y (S22) e tensões de corte τ_{xy} (S12) das juntas 2D. A seguir apresenta-se a previsão do comportamento das juntas 2D ao nível dos modos de rotura, das curvas $P-\delta$ e da resistência, obtidos através do *software* ABAQUS®. Segue-se uma comparação entre os valores numéricos de $P_{\text{máx}}$ e os obtidos no trabalho experimental, o que permitiu obter conclusões importantes. No final deste capítulo é também efetuada uma análise da resistência de reparações, na qual se utilizam diferentes configurações de reforços, para se obter informações de como é influenciada a resistência da reparação devido a estas configurações. As configurações utilizadas para esta análise são a variação da espessura dos reforços e a utilização de chanfros nas extremidades dos reforços com o objetivo de minimizar a perturbação aerodinâmica.

4.1. Condições de análise numérica

A análise numérica pelo MEF foi realizada no *software* ABAQUS®. As reparações estudadas foram modeladas com elementos 2D em estado plano de deformação (EPD [100]). As dimensões das geometrias estudadas são as mesmas que as do trabalho experimental, embora se considere adicionalmente um valor de $c=10$ mm. Neste estudo considerou-se um eixo de simetria a meio comprimento dos provetes. Em termos de condições fronteira, para reproduzir de forma fiel as condições dos ensaios, definiu-se que a extremidade onde se encontra o eixo de simetria (corte A-A, Figura 60 e Figura 61) está restringida horizontalmente e a outra extremidade está restringida apenas verticalmente, para ser evitado o movimento de corpo rígido quando submetida a um deslocamento de tração.

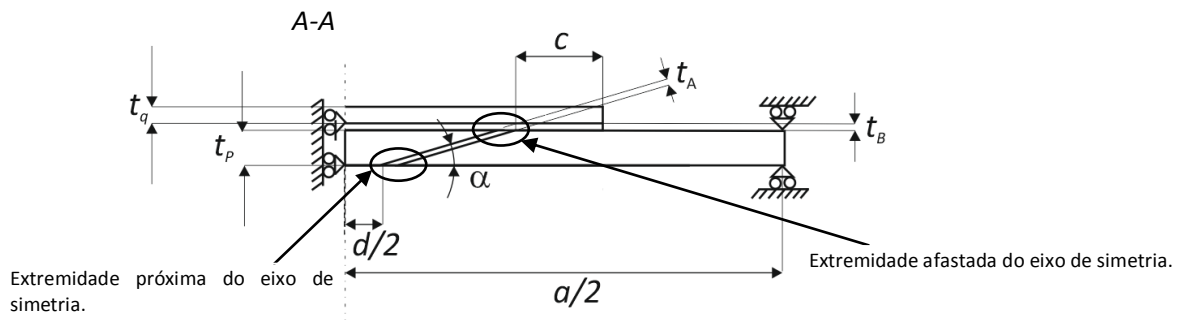


Figura 60 – Esquema com as dimensões 2D só com reforço exterior utilizado no trabalho numérico.

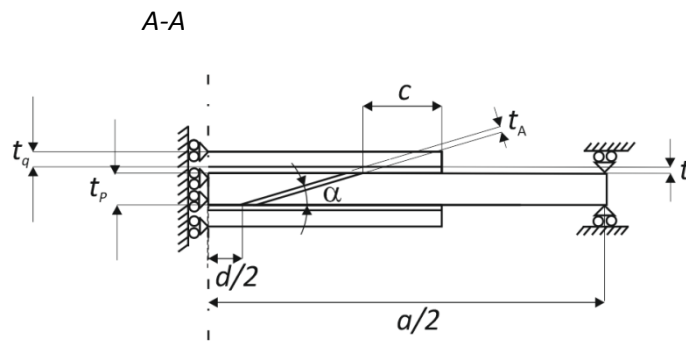


Figura 61 – Esquema com as dimensões 2D com reforço exterior e interior utilizado no trabalho numérico.

Os aderentes foram modelados por elementos contínuos de quatro nós de integração reduzida de EPD (CPE4R, cor verde), com a exceção dos elementos da interface entre o adesivo e os substratos que foram considerados como elementos contínuos de três nós de EPD (CPE3, cor rosa), para melhor interpretação ver Figura 62. A liga de alumínio foi considerada como sendo um material homogêneo e isotrópico de comportamento elástico

perfeitamente plástico. As camadas dos adesivos foram modeladas por elementos coesivos (COH2D4, cor amarela). Estes são elementos de quatro nós segundo uma lei de tração-separação triangular, que será melhor descrita no subcapítulo seguinte (Figura 67). As propriedades mecânicas utilizadas para a liga de alumínio foram apresentadas no subcapítulo 3.1 e as propriedades das leis coesivas dos adesivos Araldite® 2015 e Araldite® AV138 utilizadas para os modelos estão descritas na Tabela 9 e Tabela 10, respetivamente.

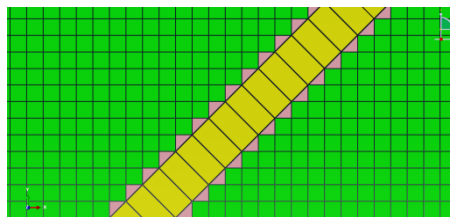


Figura 62 – Exemplo dos elementos do MEF utilizados para modelação das reparações.

Na Figura 63 apresenta-se um exemplo do aspeto final da malha utilizada para uma reparação com $\alpha=45^\circ$, $c=5$ mm e só reforço exterior. Na Figura 64 apresenta-se um exemplo do aspeto final da malha para as mesmas condições mas agora com reforço exterior e interior.

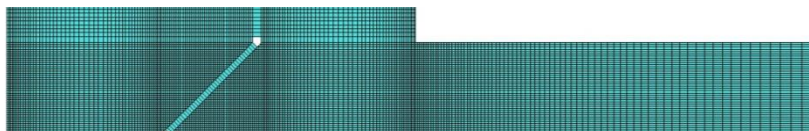


Figura 63 – Exemplo da malha da reparação com $\alpha=45^\circ$, $c=5$ mm e reforço exterior.

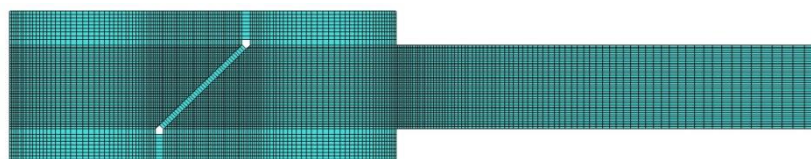


Figura 64 – Exemplo da malha da reparação com $\alpha=45^\circ$, $c=5$ mm e reforço exterior e interior.

A malha de elementos finitos foi criada através da partição da área correspondente à camada de adesivo do remendo em elementos com espaçamento de 0,1 mm na direção do seu comprimento. Desta forma, o número de elementos ao longo da camada de adesivo da reparação é definido pelo valor de α . Após esta operação, foram criadas partições entre as duas extremidades da camada de adesivo do remendo com orientações ortogonais (horizontais e verticais), por forma a conseguir uma malha sem distorções dos elementos.

Nas restantes zonas da reparação a malha foi criada automaticamente, com refinamento nas extremidades dos reforços e na descontinuidade, por serem zonas de concentração de tensões [68]. Na direção da espessura, tanto nos aderentes como nos reforços não existe refinamento da malha. Na Tabela 8 apresenta-se o número de elementos na camada de adesivo da reparação para cada α analisado.

Tabela 8 – Número de elementos coesivos na camada de adesivo do remendo para cada α .

| Ângulo de reparação α [°] | Número de elementos coesivos (COH2D4) na camada de adesivo do remendo |
|----------------------------------|---|
| 10 | 162 |
| 15 | 109 |
| 20 | 83 |
| 30 | 56 |
| 45 | 40 |

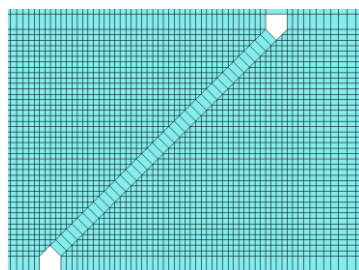


Figura 65 – Pormenor da descontinuidade para $\alpha=45^\circ$.

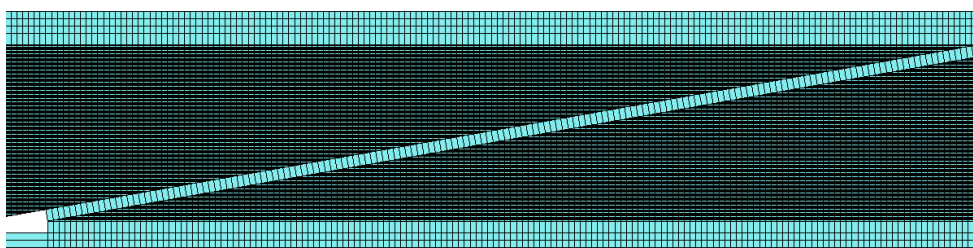


Figura 66 – Pormenor da descontinuidade para $\alpha=10^\circ$.

Na Figura 65 e Figura 66 observa-se uma descontinuidade nas extremidades da camada de adesivo da reparação. Esta descontinuidade foi considerada nos modelos numéricos devido à impossibilidade de utilização de elementos coesivos distorcidos, que ocorreriam caso existisse ligação entre os pares de nós da linha da camada de adesivo horizontal dos reforços

com os pares de nós da linha da camada de adesivo do remendo, como tal não foi considerada gradação da malha por inviabilidade e dificuldade de criação da mesma. Como foi considerada esta descontinuidade, também se torna necessário considerar a sua propagação para a camada de adesivo dos reforços. Neste capítulo, designam-se como condição A e condição B as configurações com o adesivo Araldite® 2015 ou AV138, respetivamente, em ambos os casos para diferentes valores de α , valores de c de 5 ou 10 mm e reforço exterior ou exterior e inferior.

4.2. Modelos de dano coesivo

Os modelos de dano coesivo, a partir de agora designados por MDC, têm por base uma relação entre as tensões e os deslocamentos relativos (tração ou corte) que ligam os nós homólogos dos elementos coesivos, ver Figura 67, para simular o comportamento elástico até à resistência máxima (t_n^0 em tração ou t_s^0 em corte) e subsequentemente a degradação das propriedades dos materiais até à rotura [101]. A forma da lei coesiva na zona de degradação também pode ser ajustada para reproduzir de forma fiel o comportamento de materiais distintos. A lei utilizada neste trabalho é a triangular, mas ainda existem outras formas, como a trapezoidal e a exponencial [101 e 102]. As áreas sob as leis de tração-separação em tensão ou corte (G_n ou G_s , respetivamente) são igualadas à tenacidade à fratura em tração (G_n^c) ou em corte (G_s^c), pela respetiva ordem, para aferir a propagação do dano. Sob uma solicitação de tração ou corte puro, o comportamento dos materiais segue a lei respetiva até à rotura. Sob uma carga combinada (tração e corte), são usualmente utilizados critérios de tensões ou energéticos para combinar os dois modos de solicitação, dando origem a uma lei de modo misto (Figura 67) [103].

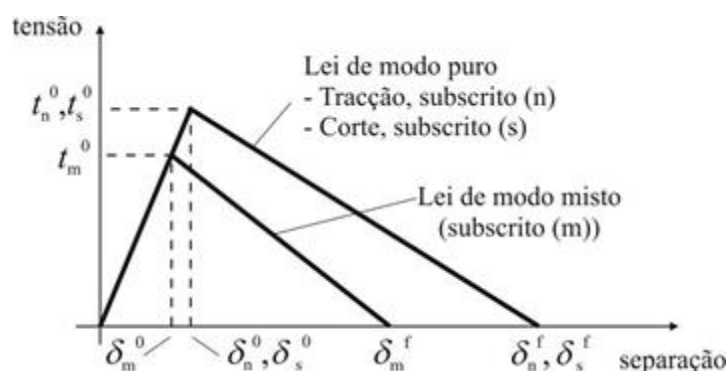


Figura 67 – Lei de tração-separação triangular disponível no ABAQUS® [103].

4.2.1. Modelo de dano triangular

A lei triangular, ver Figura 67, assume inicialmente um comportamento linear elástico, seguido de degradação linear. A elasticidade é definida por uma matriz constitutiva \mathbf{K} , que contém os parâmetros de rigidez, para relacionar as tensões e deformações em tração e corte (subscritos n e s, respetivamente).

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} \\ K_{ns} & K_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K} \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (1)$$

Para camadas finas de adesivo, uma aproximação viável é dada pelas seguintes relações, $K_{nn} = E$, $K_{ss} = G$ e $K_{ns} = 0$. A iniciação do dano pode ser especificada por diferentes critérios. Neste trabalho, foi considerado o critério quadrático de tensões que se segue para a iniciação do dano, por já ter sido provada a sua fiabilidade [104], e dado por:

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1. \quad (2)$$

$\langle \rangle$ são os parêntesis de Macaulay, que indicam que um estado de tensão puramente compressivo não contribui para a iniciação do dano [105]. Depois de atingida a resistência máxima em modo misto (t_m^0 na Figura 67), através da equação acima, a rigidez do material é degradada. A separação completa é prevista por um critério linear energético da forma

$$\frac{G_n}{G_n^c} + \frac{G_s}{G_s^c} = 1. \quad (3)$$

4.2.2. Determinação das propriedades coesivas

De modo a caracterizar as leis coesivas, em tração e corte, é necessário conhecer t_n^0 , t_s^0 , G_n^c e G_s^c . No passado foram publicados alguns estudos que por aproximação assumiam que estes parâmetros eram idênticos aos obtidos para ensaios em bruto [9, 44 e 106]. No entanto, a restrição às deformações na camada do adesivo provocada pelos substratos neste tipo de geometrias e propagação de fenda tipicamente em modo misto, levam a que haja uma diferença entre as propriedades do adesivo como material em bruto e como camada fina [107 a 109]. Assim sendo, é necessária a utilização de métodos de definição destes

valores que traduzam o comportamento dos adesivos nas condições em que estes vão ser utilizados. Para o adesivo Araldite® 2015, as leis coesivas da camada de adesivo foram determinadas num trabalho anterior [94] por um método inverso para a determinação de t_n^0 e t_s^0 . No estudo de Moura et al. [110] é apresentada uma descrição mais detalhada desta metodologia, que basicamente consiste na determinação de G_n^c e G_s^c através de ensaios *Double cantilever beam* (DCB) e *End-notched flexure* (ENF), respetivamente, usando um método ou teoria apropriados para a sua obtenção. O valor de G_n^c ou G_s^c é então utilizado para construção de uma lei coesiva no modo puro correspondente, que inicialmente tem um valor aproximado de t_n^0 ou t_s^0 , estimado em função das características do adesivo. A lei coesiva obtida é utilizada no modelo numérico correspondente (DCB para tração ou ENF para corte), com as mesmas dimensões do modelo a ser simulado. O valor de t_n^0 ou t_s^0 é então definido utilizando um procedimento de ajuste entre as curvas P - δ numéricas e experimentais do teste respetivo de caracterização à fratura, para que a lei coesiva estimada permita reproduzir fielmente o comportamento observado da camada de adesivo. A Tabela 9 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® 2015 numa lei coesiva em modo misto [111]. Os valores de E e G , módulo de elasticidade em tensão e corte da camada de adesivo, foram determinados experimentalmente com ensaios em bruto de adesivo [112] e ensaios de corte (TAST – *Thick adherend shear test*), respetivamente [113].

Tabela 9 – Parâmetros coesivos em tração e corte puros para uma camada de adesivo Araldite® 2015 com uma espessura de 0,2 mm.

| | | | |
|----------------|------|----------------|------|
| E [MPa] | 1850 | G [MPa] | 650 |
| t_n^0 [MPa] | 23,0 | t_s^0 [MPa] | 22,8 |
| G_n^c [N/mm] | 0,43 | G_s^c [N/mm] | 4,7 |

Tal como no caso anterior, para a determinação das leis coesivas para o adesivo Araldite® AV138 foi utilizado um método inverso, descrito em detalhe no trabalho de Campilho et al. [94]. No entanto, devido à não existência de ensaios de caracterização à fratura, o procedimento seguido foi ligeiramente diferente. Foram utilizados os valores de resistência à tração e corte através de ensaios em bruto e ensaio de corte TAST, respetivamente para a definição de t_n^0 e t_s^0 . Estes valores foram utilizados para a construção de leis coesivas

aproximadas, utilizando inicialmente valores típicos de G_n^c e G_s^c para adesivos frágeis. As leis obtidas para tração e corte foram utilizadas no modelo numérico para uma das geometrias testadas (a junta de sobreposição simples com comprimento de sobreposição de 20 mm), e as leis do adesivo foram estimadas de forma idêntica ao caso anterior por ajuste das curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais. Os valores obtidos foram subsequentemente aplicados a todas as configurações testadas com resultados bastante satisfatórios. Os valores de E e G foram determinados experimentalmente com ensaios em bruto e ensaios de corte (TAST). No trabalho referido [111] conclui-se que os parâmetros obtidos reproduzem de forma fiel as propriedades dos adesivos. A Tabela 10 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® AV138 numa lei coesiva em modo misto [111].

Tabela 10 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com uma espessura de 0,2 mm.

| | | | |
|----------------|-------|----------------|------|
| E [MPa] | 4890 | G [MPa] | 1560 |
| t_n^0 [MPa] | 39,45 | t_s^0 [MPa] | 30,2 |
| G_n^c [N/mm] | 0,2 | G_s^c [N/mm] | 0,38 |

4.3. Análise de tensões das juntas 2D

Com objetivo de estudar a influência dos valores de α , c e da utilização de reforços exteriores ou exteriores e interiores, no campo das tensões gerado ao longo das camadas de adesivos, são apresentados os valores de tensão ao longo das camadas de adesivo para os ângulos α limite, 10° e 45° , sendo remetidas para o Apêndice 3 e Apêndice 4 os restantes exemplos. Esta análise foi efetuada unicamente para o adesivo Araldite® 2015, pois não há diferença significativa entre os dois adesivos no regime elástico para as tensões de arrancamento e de corte [114]. De modo a obter-se a distribuição das tensões e a efetuar-se a comparação entre os valores obtidos para as várias configurações de reparação, considerou-se para todos os casos de estudo o primeiro incremento (ou seja, considerou-se valores idênticos de deslocamento aplicado) dos resultados obtidos pelo *software* ABAQUS® e as tensões a meio da camada de adesivo, que foi dividida em 12 partes iguais na direção da espessura. Os modelos para a obtenção das tensões foram alterados pela substituição dos elementos coesivos do adesivo por elementos sólidos e refinamento adicional da malha para

se evitar quebras nas distribuições de tensões decorrentes da utilização de uma malha grosseira (Figura 68). Para a obtenção das distribuições de tensões na camada de adesivo dos remendos, que se encontram à inclinação α da horizontal, é recomendável a utilização de um sistema de eixos cujas direções sejam a tangente e ortogonal à camada de adesivo [56]. No entanto, devido a limitações de *software*, neste estudo é feita a aproximação de considerar as tensões de arrancamento e corte do adesivo pelo sistema de eixos dos modelos, ou seja, considerando as tensões de arrancamento como sendo tensões normais com direção vertical e as tensões de corte na direção horizontal. Considera-se que esta aproximação é fiável para a comparação das diferentes geometrias, embora introduza algumas inconsistências, nomeadamente existência de tensões de arrancamento negativas na camada de adesivo no remendo.

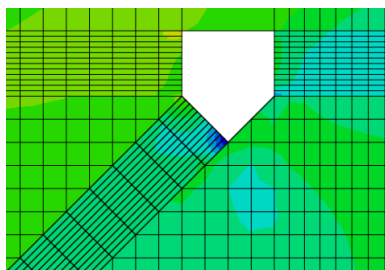


Figura 68 – utilização de 12 elementos sólidos para modelação do adesivo na direção da espessura.

4.3.1. Tensões de arrancamento

As seguintes figuras apresentam as distribuições de tensões σ_y para a camada de adesivo do remendo, para a camada de adesivo do reforço exterior e para a camada de adesivo do reforço interior quando aplicável. O eixo das abcissas x representa o comprimento das camadas de adesivo enquanto o eixo das ordenadas y representa o valor da tensão em estudo.

1. Tensão de arrancamento σ_y para a camada de adesivo do remendo

Apresenta-se a Figura 69, que corresponde à identificação da camada de adesivo da reparação. Realiza-se esta identificação de modo a permitir uma melhor identificação dessa camada de adesivo em estudo. Na Figura 70 apresentam-se as distribuições das tensões de arrancamento σ_y para a camada de adesivo da reparação e para $\alpha=10^\circ$.

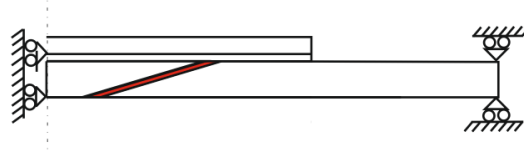


Figura 69 – Identificação da camada de adesivo do remendo para a obtenção dos valores da tensão de arrancamento.

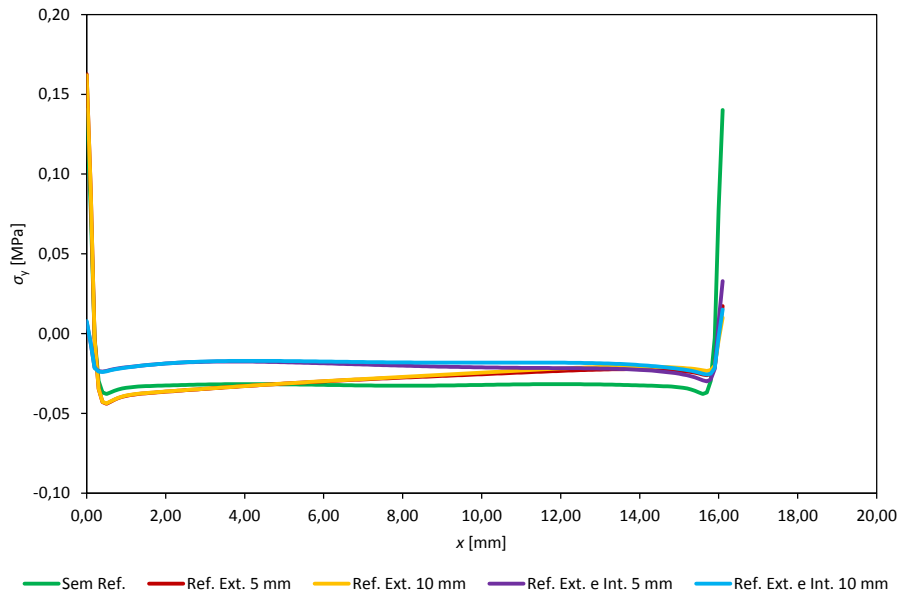


Figura 70 – Tensão de arrancamento σ_y , para a camada de adesivo do remendo, com $\alpha=10^\circ$ para as diferentes configurações.

Pela Figura 70 observa-se que as distribuições das tensões de arrancamento são praticamente uniformes ao longo da maior parte do comprimento da camada de adesivo da reparação, com a exceção das extremidades da camada de adesivo do remendo onde ocorrem concentrações de tensão [56].

Para $\alpha=10^\circ$ as conclusões que se podem retirar da Figura 70 são que, para a situação de utilização de apenas reforço exterior e quando comparadas com a situação de não ter qualquer reforço, na extremidade mais perto do eixo de simetria houve um ligeiro aumento do valor da tensão de arrancamento. Isto ocorre devido a uma deflexão da reparação por causa da aplicação de reforço exterior. Na extremidade mais afastada do eixo de simetria houve uma diminuição do valor da tensão. Em relação à condição de se aplicar tanto reforço exterior como interior e quando comparada com a condição de sem reforço, pela Figura 70, observa-se uma diminuição do valor da tensão de arrancamento e também uma redução dos picos de tensão nas duas extremidades da camada de adesivo da reparação. Estas reduções

dos valores da tensão e dos picos com a utilização de reforços são benéficas em relação à não utilização de reforços, pois implicam uma diminuição do valor médio da tensão e uma distribuição de tensão mais uniforme ao longo da camada de adesivo.

Na Figura 71 – (a) e (b) são ilustradas a distribuição da tensão de arrancamento σ_y na camada de adesivo para a reparação com $\alpha=10^\circ$ e sem a aplicação de reforços.

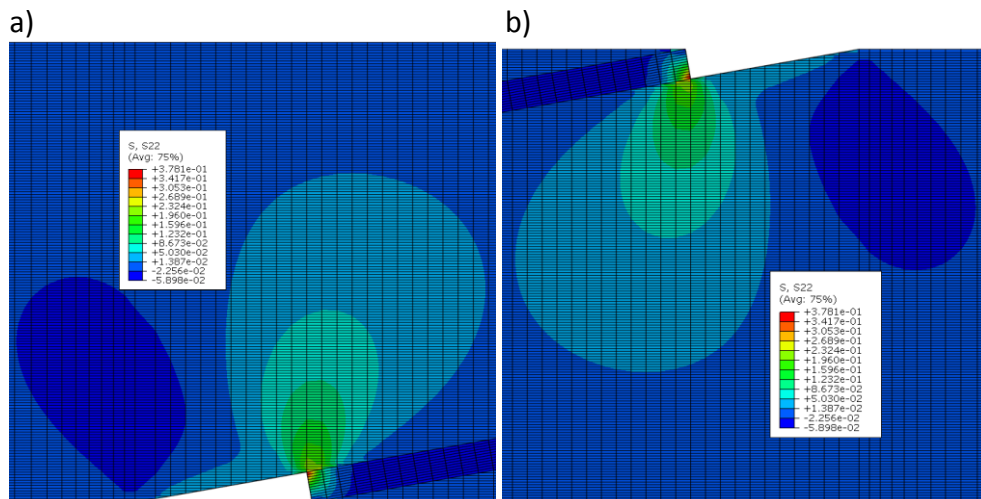


Figura 71 – Tensão de arrancamento σ_y , para a zona do remendo com $\alpha=10^\circ$ na extremidade próxima do eixo de simetria (a) e na extremidade afastada do eixo de simetria (b).

Na Figura 72 apresentam-se as distribuições das tensões de arrancamento σ_y para a camada de adesivo da reparação e para $\alpha=45^\circ$.

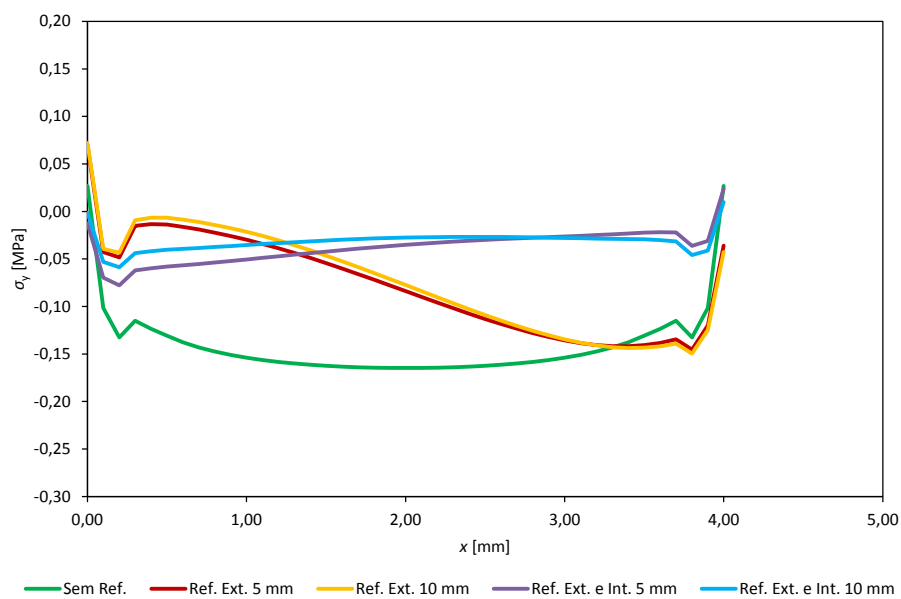


Figura 72 – Tensão de arrancamento σ_y , para a camada de adesivo do remendo, com $\alpha=45^\circ$ para as diferentes configurações.

Pela Figura 72 observa-se que existem picos de tensão nas extremidades da camada de adesivo da reparação. Para a situação de existir apenas reforço exterior, pela Figura 72 observa-se que para a zona da reparação que se encontra na extremidade sem reforço existe um aumento da tensão de arrancamento, mas para a outra extremidade houve uma diminuição do valor da tensão de arrancamento quando comparada com a situação de não existir qualquer reforço. Isto deve-se à deflexão transversal da junta devido à excentricidade da carga transmitida, o que provoca a abertura da extremidade não reforçada do remendo [53]. Para o caso de ser aplicado tanto reforço exterior como interior, houve uma redução do valor das tensões de arrancamento e também uma redução significativa dos picos de tensão nas extremidades da camada de adesivo em relação à situação de não existirem reforços. Isto ocorre pois com a utilização de reforços exteriores e interiores reduz-se o efeito das concentrações de tensões nas extremidades da camada de adesivo da reparação. Outra observação é que existe uma ligeira redução dos valores das tensões na extremidade perto do eixo de simetria para $c=10$ mm comparativamente a $c=5$ mm. Para a extremidade mais afastada do eixo simetria ocorre o oposto, ou seja, existe um ligeiro aumento do valor da tensão de arrancamento para a reparação com $c=10$ mm.

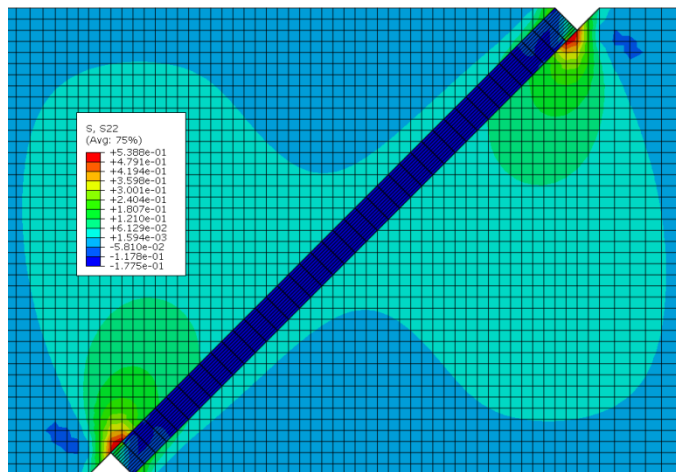


Figura 73 – Tensão de arrancamento σ_y , para a zona do remendo com $\alpha=45^\circ$.

Na Figura 73 é ilustrada a distribuição da tensão de arrancamento σ_y na camada de adesivo do remendo para a reparação com $\alpha=45^\circ$ e sem a aplicação de reforços.

2. Tensão de arrancamento σ_y para a camada de adesivo do reforço exterior

Apresenta-se a Figura 74, que corresponde à identificação da camada de adesivo do reforço exterior. Realiza-se esta identificação de modo a permitir uma melhor interpretação de qual é a camada de adesivo em análise. Na Figura 75 apresentam-se as distribuições das tensões de σ_y para a camada de adesivo do reforço exterior em todas as configurações nas quais foram aplicados esse tipo de reforço e para $\alpha=10^\circ$.

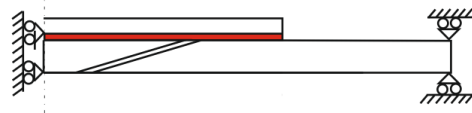


Figura 74 – Identificação da camada de adesivo do reforço exterior para a obtenção dos valores da tensão de arrancamento.

Pela Figura 75 observa-se que a porção da camada de adesivo entre o eixo de simetria e a extremidade da reparação tem tensões praticamente nulas. Para a extremidade livre da porção da camada de adesivo a seguir à extremidade da reparação também se observa existência de picos de tensão o que potenciará a iniciação da rotura. Quando se efetua uma comparação entre valores de c nota-se que existe uma ligeira diminuição dos valores da tensão para os casos de $c=10$ mm quando comparada com $c=5$ mm.

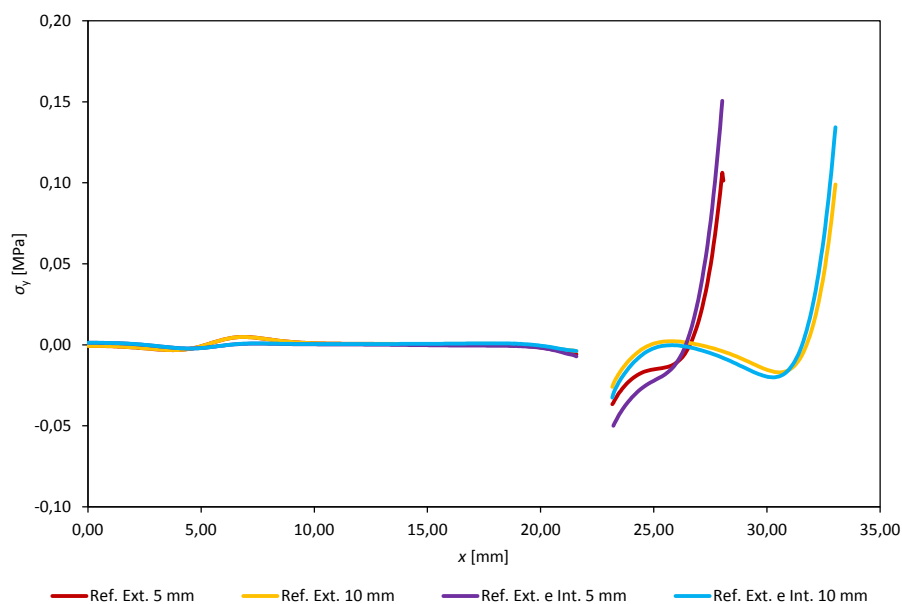


Figura 75 – Tensão de arrancamento σ_y , para a camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=10^\circ$ para as diferentes configurações.

Na Figura 76 – (a) e (b) é ilustrada a distribuição da tensão σ_y na camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=10^\circ$ e com $c=5$ mm. Pela Figura 76 – (a) e (b) observa-se que existe concentração de tensão na extremidade da camada de adesivo da reparação sem reforço e que também existe concentração de tensão na extremidade livre da camada de adesivo do reforço.

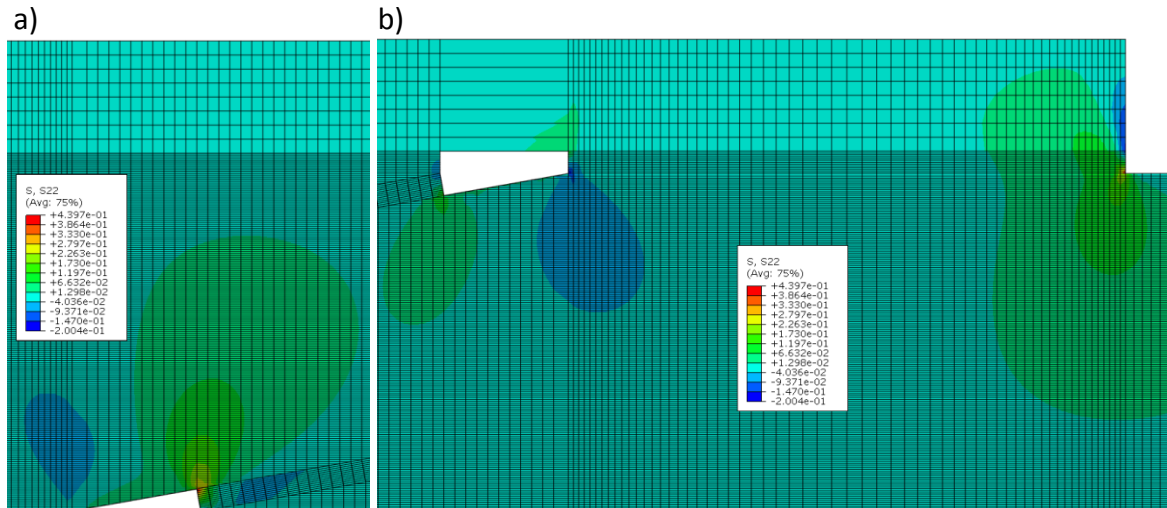


Figura 76 – Tensão de arrancamento σ_y , para a camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=10^\circ$ e $c=5$ mm para a extremidade próxima do eixo de simetria (a) e para a extremidade afastada do eixo de simetria (b).

Na Figura 77 – (a) e (b) é ilustrada a distribuição da tensão de σ_y na camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=10^\circ$ e $c=10$ mm. Observam-se também as mesmas zonas de concentração de tensão que foram previamente descritas para $c=5$ mm.

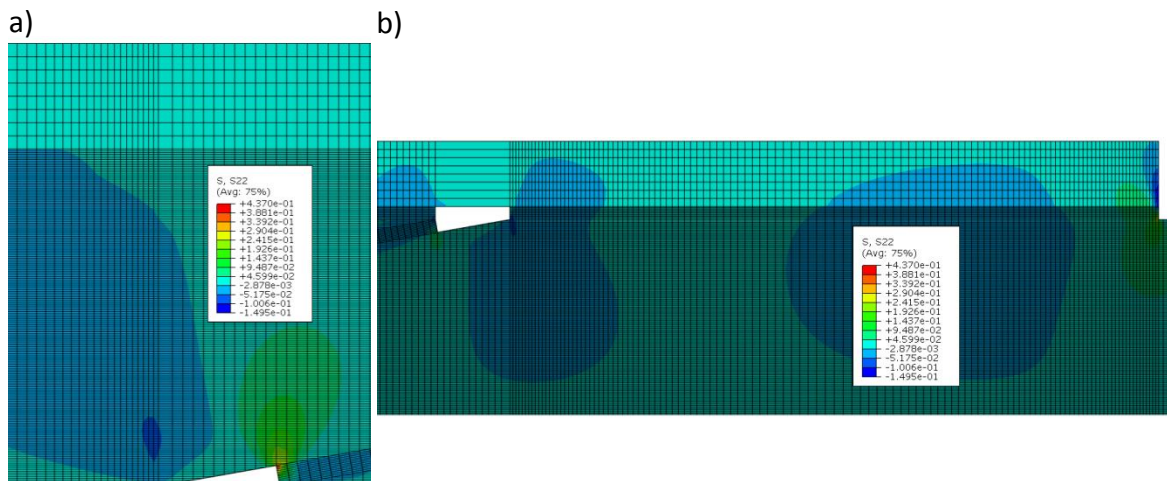


Figura 77 – Tensão de arrancamento σ_y , para a camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=10^\circ$ e $c=10$ mm, para a extremidade próxima do eixo de simetria (a) e para a extremidade afastada do eixo de simetria (b).

Na Figura 78 apresentam-se as distribuições das tensões de arrancamento σ_y para a camada de adesivo do reforço exterior para todas configurações em que foram aplicados esse tipo de reforço e para $\alpha=45^\circ$. As distribuições de tensões apresentadas na Figura 78 são idênticas às obtidas para $\alpha=10^\circ$, com exceção do pico de tensão observado na extremidade da porção da camada de adesivo do reforço antes da descontinuidade. Pela Figura 78 observa-se uma redução dos valores da tensão de arrancamento na zona antes da descontinuidade ao utilizar reforço exterior como interior, comparativamente à utilização de apenas reforço exterior. No início da porção da camada de adesivo do reforço exterior a seguir à descontinuidade, observam-se picos de tensão e na extremidade livre do reforço também se observam picos de tensão, sendo estes últimos os mais importantes pois são os que potenciarão a iniciação da rotura.

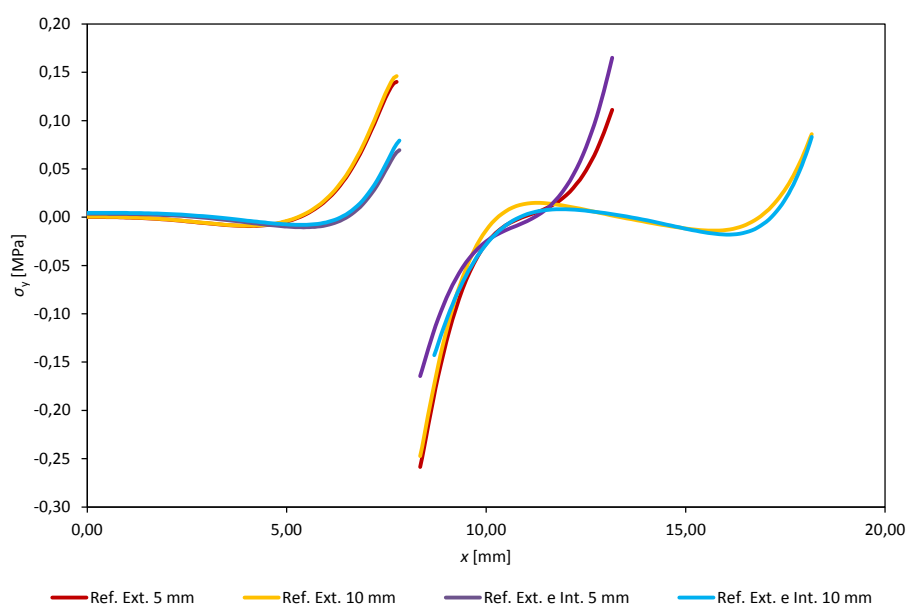


Figura 78 – Tensão de arrancamento σ_y , para a camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=45^\circ$ para as diferentes configurações.

Na Figura 79 ilustra-se a distribuição da tensão σ_y para a camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=45^\circ$ e $c=5$ mm. Pela Figura 79 observa-se que existe concentração de tensão na extremidade da camada de adesivo do remendo não reforçada e concentração de tensão na extremidade da camada de adesivo do remendo onde se utiliza o reforço. Na Figura 80 ilustra-se a distribuição da tensão de σ_y para a camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=45^\circ$ e $c=10$ mm. Pela Figura 80 observa-se novamente que existe concentração de tensão

na extremidade da camada de adesivo da reparação sem reforço e concentração de tensão na extremidade da camada de adesivo da reparação onde se utiliza o reforço.

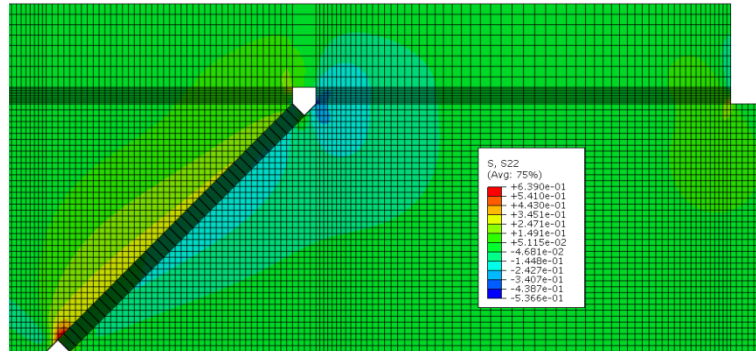


Figura 79 – Tensão de arrancamento σ_y , para a camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=45^\circ$ e $c=5$ mm.

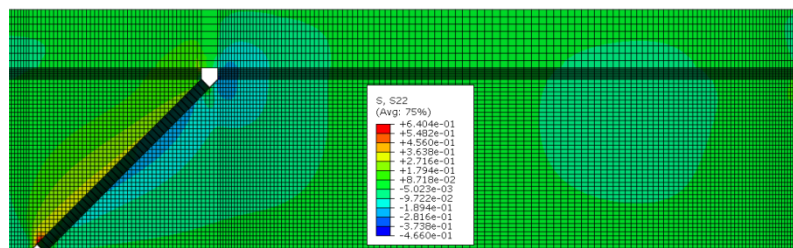


Figura 80 – Tensão de arrancamento σ_y , para a camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=45^\circ$ e $c=10$ mm.

3. Tensão de arrancamento σ_y , para a camada de adesivo do reforço interior

Apresenta-se a Figura 81, que corresponde à identificação da camada de adesivo do reforço interior. Realiza-se esta identificação de modo a permitir uma melhor interpretação de qual é a camada de adesivo em análise.

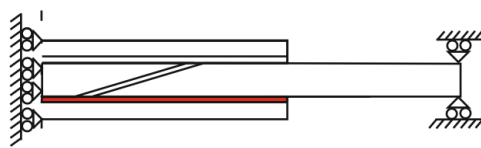


Figura 81 – Identificação da camada de adesivo do reforço interior para a obtenção dos valores da tensão de arrancamento.

Na Figura 82 apresentam-se as distribuições das tensões de σ_y para a camada de adesivo do reforço interior, quando aplicável, e para $\alpha=10^\circ$. Pela Figura 82 observa-se que, na porção da camada de adesivo do reforço interior antes da descontinuidade, existem picos de concentração de tensão. Para a porção da camada de adesivo do reforço interior a seguir à descontinuidade, a distribuição da tensão é praticamente uniforme, com exceção da extremidade do reforço inferior onde se observam novamente picos de tensão na qual

transformam esta zona numa zona crítica em termos de início de rotura da camada de adesivo. Pela Figura 82 não se observa diferença da distribuição da tensão de arrancamento quando se comparam os dois valores de c em análise. Não se observa diferença entre o valor obtido para o pico da tensão de arrancamento na extremidade livre da porção da camada de adesivo do reforço interior (ver Figura 82), relativamente ao reforço exterior (ver Figura 75).

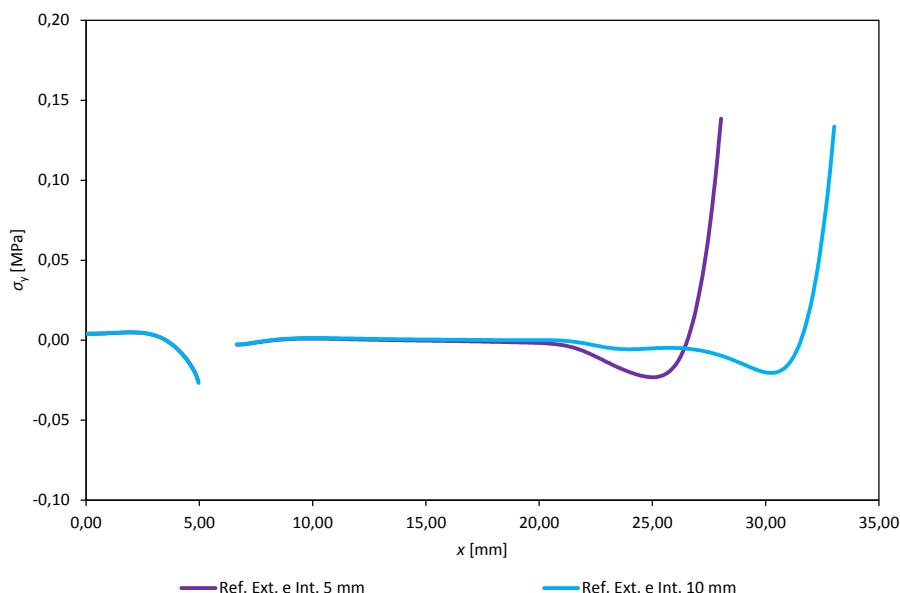


Figura 82 – Tensão de arrancamento σ_y , para a camada de adesivo do reforço interior, com $\alpha=10^\circ$ para as diferentes configurações.

Na Figura 83 – (a) e (b) ilustra-se a distribuição da tensão de arrancamento σ_y para a camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=10^\circ$ e $c=5$ mm.

Pela Figura 83 – (a) e (b), observa-se que existe concentração de tensão nas extremidades da camada de adesivo da reparação e também se observa que existe concentração de tensão na extremidade livre das camadas de adesivo dos reforços, tanto no exterior como interior. Na Figura 84 – (a) e (b) ilustra-se a distribuição da tensão de arrancamento σ_y para a camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=10^\circ$ e $c=10$ mm. Neste caso também se evidenciam as mesmas zonas de concentração de tensão que foram enunciadas para a condição de reparações com $\alpha=10^\circ$, $c=5$ mm e com a utilização de reforço exterior e interior. Na Figura 85 apresentam-se as distribuições das tensões de σ_y para a camada de adesivo do reforço interior, quando aplicável, e para $\alpha=45^\circ$.

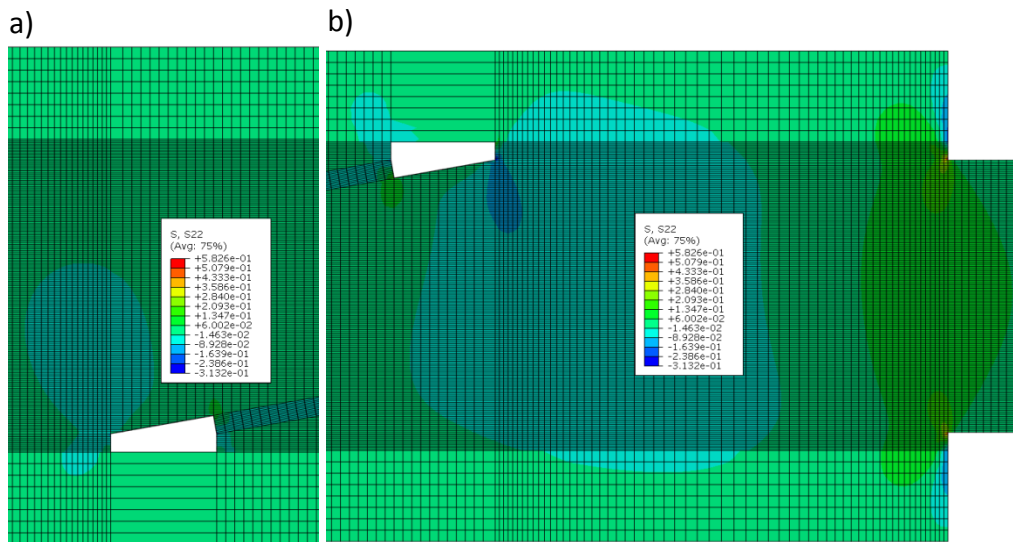


Figura 83 – Tensão de arrancamento σ_y , para a camada de adesivo do reforço exterior e interior, com $\alpha=10^\circ$ e $c=5$ mm para a extremidade próxima do eixo de simetria (a) e para a extremidade afastada do eixo de simetria (b).

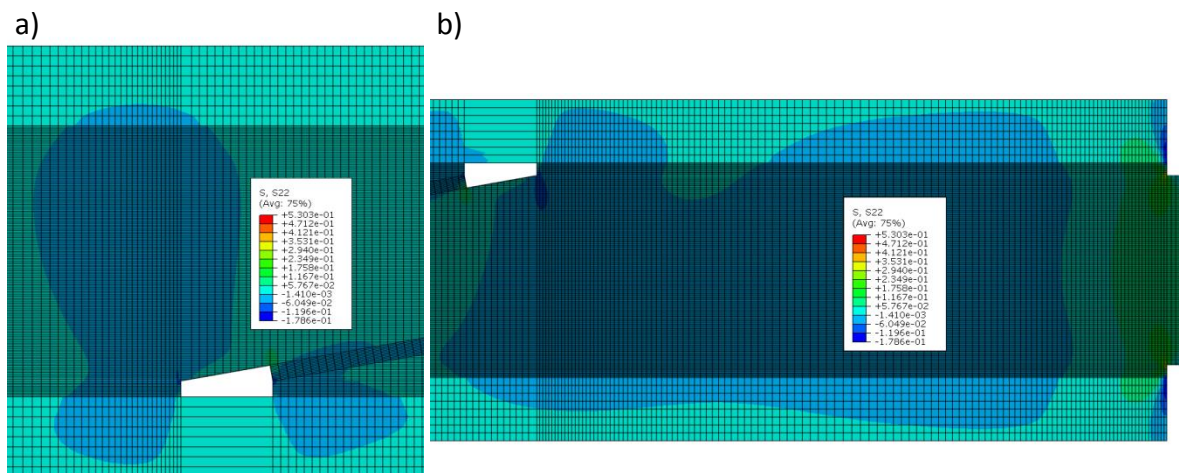


Figura 84 – Tensão de arrancamento σ_y , para a camada de adesivo do reforço exterior e interior, com $\alpha=10^\circ$ e $c=10$ mm para a extremidade próxima do eixo de simetria (a) e para a extremidade afastada do eixo de simetria (b).

Pela Figura 85 observa-se novamente picos de tensão na porção da camada de adesivo do reforço interior antes da descontinuidade, mas de valor superior aos observados para $\alpha=10^\circ$. A maior diferença observada na distribuição de tensões σ_y com $\alpha=45^\circ$ quando comparada com a distribuição de tensões de $\alpha=10^\circ$ (ver Figura 82), é que para $\alpha=45^\circ$, também se observam picos de tensão na extremidade da porção da camada de adesivo do reforço interior imediatamente a seguir à descontinuidade. Na extremidade livre do reforço observam-se picos de tensão em ambos os casos que transformam esta zona numa zona

crítica em termos de iniciação da rotura. Pela Figura 85 observa-se que existe uma redução dos valores da tensão σ_y para o caso de $c=10$ mm quando comparado com $c=5$ mm. Na Figura 86 ilustra-se a distribuição da tensão σ_y para a camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=45^\circ$ e $c=5$ mm. Pela Figura 86 observam-se picos de tensão nas extremidades da camada de adesivo do remendo e nas extremidades livres tanto do reforço exterior como interior. Na Figura 87 ilustra-se a distribuição da tensão de arrancamento σ_y para a camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=45^\circ$ e com $c=10$ mm. Na Figura 87 observam-se as mesmas zonas de concentração de tensão que foram descritas para Figura 86.

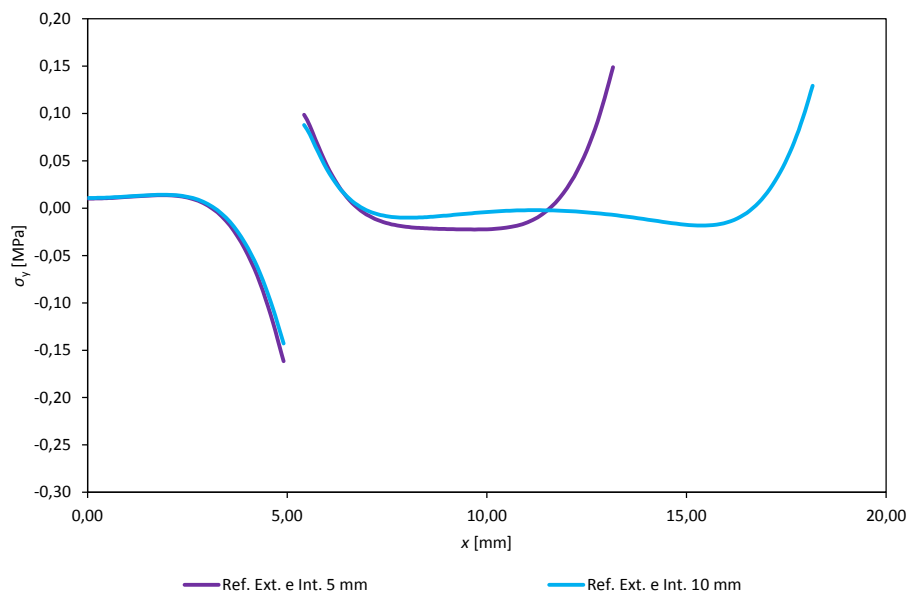


Figura 85 – Tensão de arrancamento σ_y , para a camada de adesivo do reforço interior, com $\alpha=45^\circ$ para as diferentes configurações.

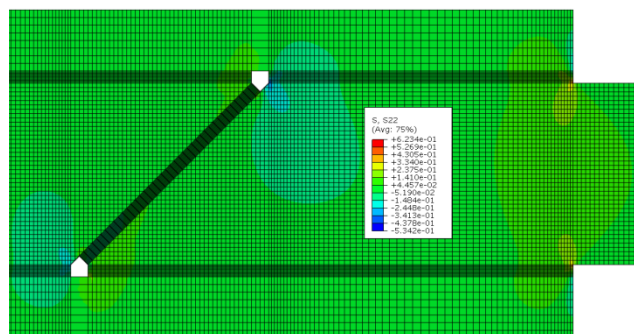


Figura 86 – Tensão de arrancamento σ_y , para a camada de adesivo do reforço exterior e interior, com $\alpha=45^\circ$ e $c=5$ mm.

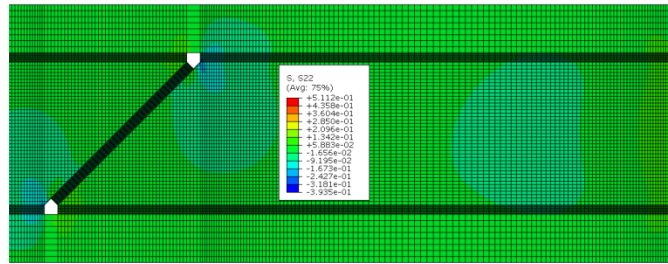


Figura 87 – Tensão de arrancamento σ_y , para a camada de adesivo do reforço exterior e interior, com $\alpha=45^\circ$ e $c=10$ mm.

4.3.2. Tensões de corte

Neste ponto serão apresentadas as figuras referentes as distribuições de tensões de corte τ_{xy} , para a camada de adesivo do remendo, para a camada de adesivo do reforço exterior e para a camada de adesivo do reforço interior quando se utilizam as duas condições de utilização de reforço.

1. Tensão de corte τ_{xy} para a camada de adesivo do remendo

Na Figura 88 apresentam-se as distribuições das tensões de corte τ_{xy} para a camada de adesivo do remendo (Figura 69) e para $\alpha=10^\circ$.

Pela Figura 88 observam-se ligeiras concentrações de tensões nas extremidades da camada de adesivo do remendo e nessas zonas as tensões de corte diminuem rapidamente de valor [56, 63 e 64]. Observa-se que na extremidade da camada de adesivo do remendo próxima do eixo de simetria existe um ligeiro aumento do valor da tensão de corte e para a extremidade mais afastada do eixo de simetria existe uma diminuição do valor da tensão, este comentário é aplicado ao caso de se aplicar apenas reforço exterior e quando comparado com o caso de não se aplicar qualquer reforço. Sobre a utilização conjunta de reforço exterior e interior, comparativamente à situação interior, observa-se uma diminuição do valor da tensão de corte média e também uma redução dos picos de tensão nas extremidades da camada de adesivo do remendo. Para o caso de só se aplicar reforço exterior, pela análise da distribuição da tensão de corte depreende-se que rotura se potenciará pela extremidade livre da camada de adesivo do remendo. Sobre a redução da tensão de corte média com a utilização conjunta de reforço exterior e interior e pela análise da distribuição da tensão de corte depreende-se que a reparação obtêm provavelmente um

melhor rendimento quando aplicados os dois reforços e também com o aumento de c . Na Figura 89 – (a) e (b) são ilustradas a distribuição da tensão de corte τ_{xy} na camada de adesivo para a reparação com $\alpha=10^\circ$ e sem a aplicação de reforços.

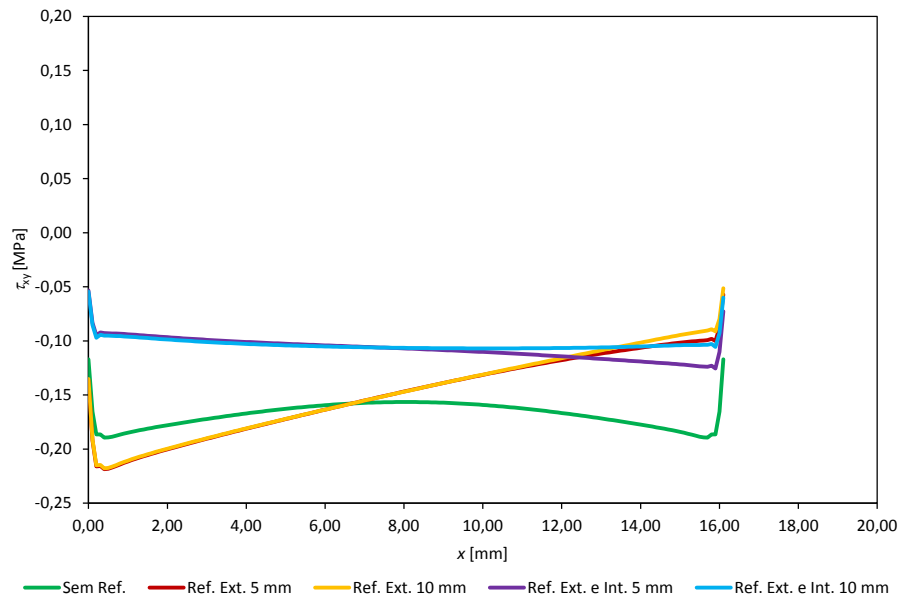


Figura 88 – Tensão de corte τ_{xy} , para a camada de adesivo do remendo, com $\alpha=10^\circ$ para as diferentes configurações.

Pela Figura 89 – (a) e (b) observam-se concentrações de tensão de corte nas extremidades da camada de adesivo do remendo. Na Figura 90 apresentam-se as distribuições das tensões de corte τ_{xy} para a camada de adesivo da reparação (Figura 69) e para $\alpha=45^\circ$.

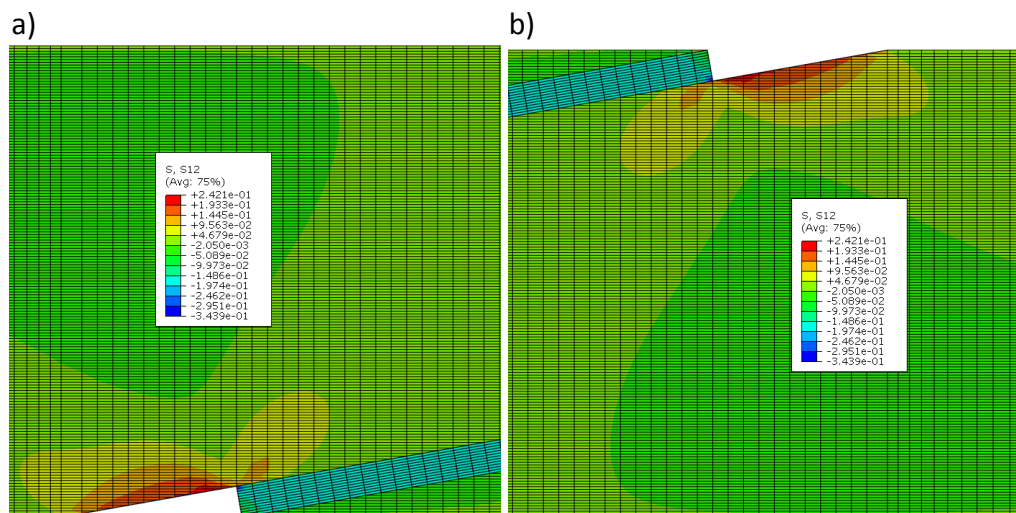


Figura 89 – Tensão de corte τ_{xy} , para a zona do remendo com $\alpha=10^\circ$ na extremidade próxima do eixo de simetria (a) e na extremidade afastada do eixo de simetria (b).

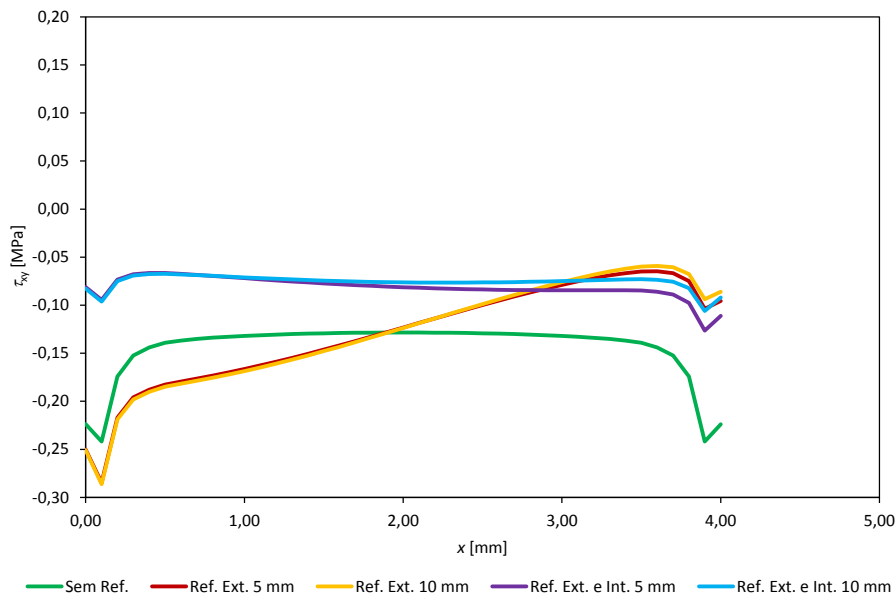


Figura 90 – Tensão de corte τ_{xy} , para a camada de adesivo do remendo, com $\alpha=45^\circ$ para as diferentes configurações.

Para o caso de se aplicar apenas reforço exterior, pela Figura 90 observa-se que para a extremidade sem reforço da camada de adesivo do remendo existe um aumento do valor do pico da tensão de corte, mas para a extremidade da camada de adesivo do remendo onde se aplica o reforço existe uma diminuição do valor médio da tensão de corte, quando comparado com a reparação não reforçada. Para o caso de se aplicar tanto reforço exterior como interior, pela Figura 90 observa-se que existe uma redução global do valor da tensão de corte ao longo da camada de adesivo do remendo e também uma redução significativa dos picos de tensão nas extremidades da camada de adesivo do remendo quando comparado com a reparação não reforçada. Estas reduções dos valores da tensão de corte ocorrem pois os efeitos das concentrações de tensões nas extremidades da camada de adesivo do remendo são minimizados com a aplicação de reforços exteriores e interiores. Na Figura 90 também se observa que existe uma redução dos valores das tensões para $c=10$ mm em relação $c=5$ mm na extremidade da camada de adesivo do remendo perto do eixo de simetria, na extremidade da camada de adesivo do remendo mais afastada do eixo simetria ocorre o oposto, existe um ligeiro aumento do valor da tensão de arrancamento para a reparação com $c=10$ mm em relação à reparação com $c=5$ mm. Em primeiro lugar a reparação que mais potenciará a iniciação da rotura é a reparação não reforçada, em segundo lugar é a reparação em que se aplica só reforço exterior, e neste caso é preferível a utilização de $c=10$ mm em vez de $c=5$ mm. Por último a reparação que menos potenciará a

iniciação da rotura são as reparações em que se utilizam ambos os reforços e também à medida que c aumenta observam-se reduções do valor da tensão, o que permite um melhor rendimento da reparação.

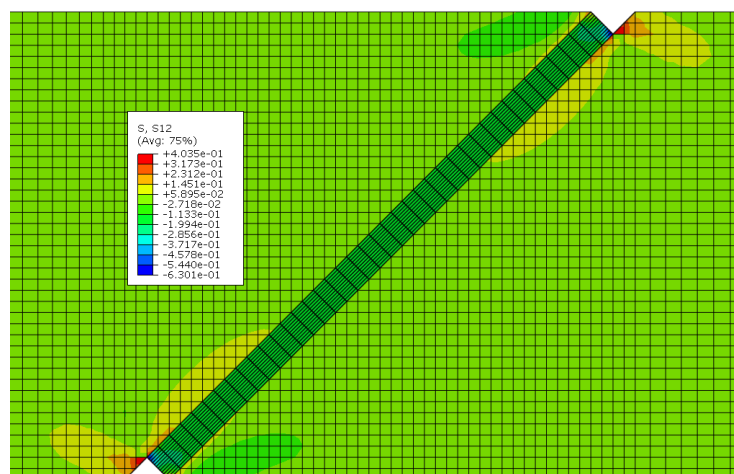


Figura 91 – Tensão de corte τ_{xy} , para a zona do remendo, com $\alpha=45^\circ$.

Na Figura 91 são ilustradas a distribuição da tensão de corte τ_{xy} na camada de adesivo para a reparação com $\alpha=45^\circ$ e sem a aplicação de reforços.

2. Tensão de corte τ_{xy} para a camada de adesivo do reforço exterior

Na Figura 92 apresentam-se as distribuições das tensões de corte τ_{xy} para a camada de adesivo do reforço exterior (Figura 74) em todas as configurações nas quais foram aplicados esse tipo de reforço e para $\alpha=10^\circ$. Para ambas as configurações de reforço as tensões de corte na camada de adesivo do reforço exterior são praticamente nulas antes da descontinuidade. No entanto, pela Figura 92 observa-se que existe uma pequena oscilação dos valores de τ_{xy} na zona perto do eixo de simetria para o caso de só se aplicar reforço exterior. Para a porção da camada de adesivo do reforço exterior a seguir à descontinuidade, observam-se picos de tensão nas duas extremidades e que existe um aumento dos valores de tensão para o caso de se utilizar tanto de reforço exterior como interior quando comparado com o caso de só existir reforço exterior e isto ocorre tanto para $c=5$ mm e 10mm. Quando se comparam valores de c nota-se que existe uma ligeira diminuição de τ_{xy} para de $c=10$ mm quando comparado com $c=5$ mm.

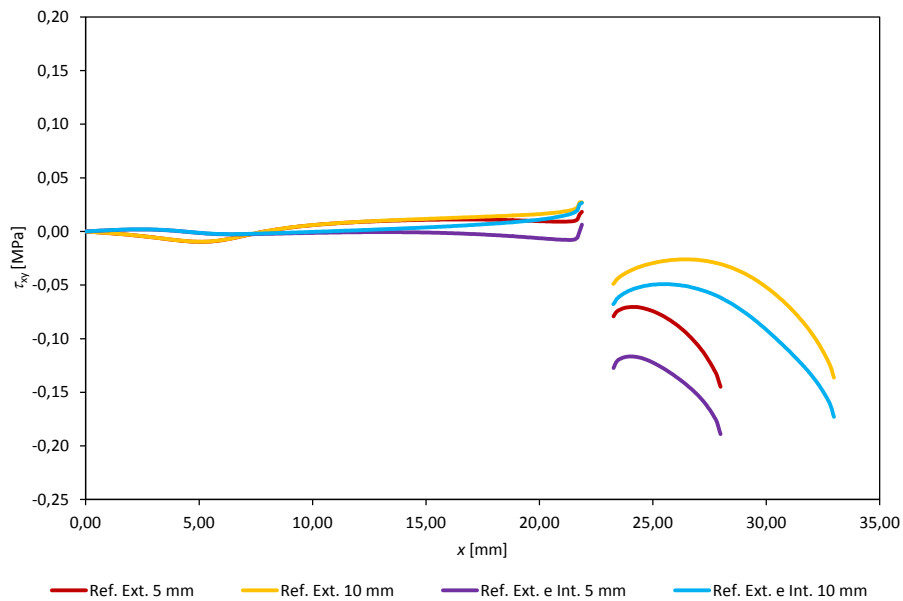


Figura 92 – Tensão de corte τ_{xy} , para a camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=10^\circ$ para as diferentes configurações.

Pela distribuição das tensões de corte ao longo da camada de adesivo do reforço exterior presente na Figura 92 a rotura potenciará pela porção da camada de adesivo a seguir à descontinuidade pois é nesta porção da camada de adesivo e na extremidade livre do reforço que se observam os maiores valores de τ_{xy} . Para os casos em que se aplica apenas reforço exterior observa-se uma diminuição do valor de τ_{xy} quando comparado com os casos de se utilizar ambos os reforços e isto ocorre tanto para $c=5$ mm como para $c=10$ mm.

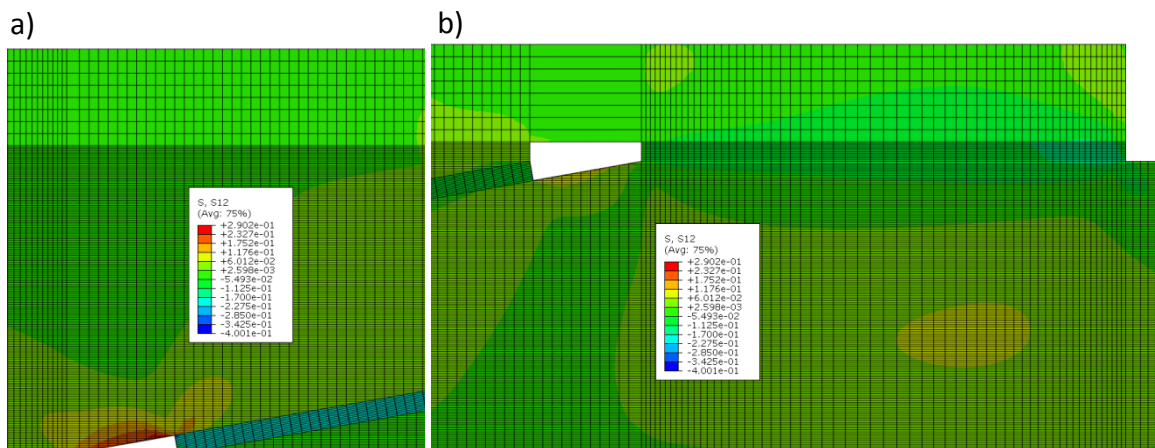


Figura 93 – Tensão de corte τ_{xy} , para a camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=10^\circ$ e $c=5$ mm para a extremidade próxima do eixo de simetria (a) e para a extremidade afastada do eixo de simetria (b).

Na Figura 93 – (a) e (b) é ilustrada a distribuição da tensão τ_{xy} na camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=10^\circ$ e $c=5$ mm. Pela Figura 93 – (a) e (b) observa-se que existe

concentração de tensão na extremidade da camada de adesivo da reparação sem reforço e que também existe concentração de tensão na extremidade livre da camada de adesivo do reforço. Na Figura 94 – (a) e (b) é ilustrada a distribuição da tensão de corte τ_{xy} na camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=10^\circ$ e $c=10$ mm. Observam-se as mesmas zonas de concentração de tensão que foram descritas para Figura 93 – (a) e (b).

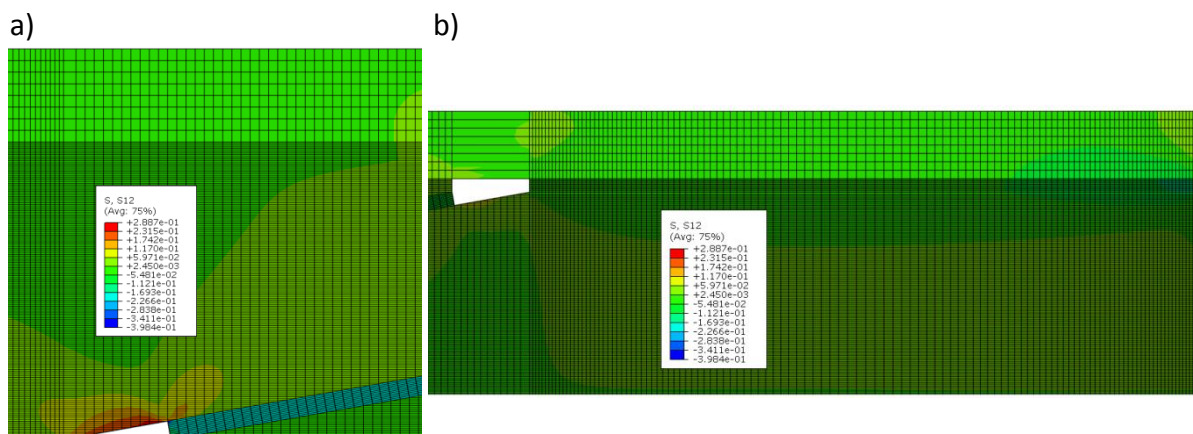


Figura 94 – Tensão de corte τ_{xy} , para a camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=10^\circ$ e $c=10$ mm para a extremidade próxima do eixo de simetria (a) e para a extremidade afastada do eixo de simetria (b).

Na Figura 95 apresentam-se as distribuições das tensões de corte τ_{xy} para a camada de adesivo do reforço exterior com $\alpha=45^\circ$ e para todas configurações em que foram aplicados esse tipo de reforços. Pela Figura 95 observam-se que existem picos de tensão, para o caso de se aplicar apenas reforço exterior, na porção da camada de adesivo do remendo exterior na extremidade imediatamente antes da descontinuidade e para o caso de se aplicarem ambos os reforços observa-se um ligeiro pico de tensão nessa mesma zona. Na porção da camada de adesivo do reforço exterior a seguir à descontinuidade observa-se o mesmo que foi descrito para $\alpha=10^\circ$. Pela Figura 95 também se observa uma redução dos valores τ_{xy} na porção da camada de adesivo do reforço exterior antes da descontinuidade, para a condição em que se aplica tanto reforço exterior como interior, quando comparado com a condição em que só se aplica reforço exterior.

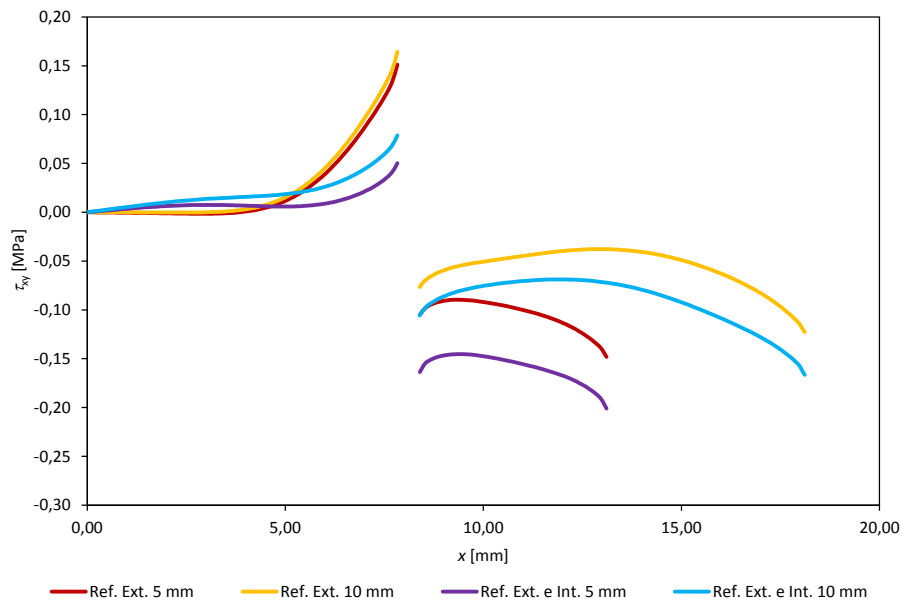


Figura 95 – Tensão de corte τ_{xy} , para a camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=45^\circ$ para as diferentes configurações.

Na Figura 96 ilustra-se a distribuição da tensão τ_{xy} para a camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=45^\circ$ e $c=5$ mm. Pela Figura 96 observa-se concentração de tensão na extremidade da camada de adesivo do remendo sem reforço e também concentração de tensão ao longo da camada de adesivo do remendo e na extremidade em que se utiliza reforço.

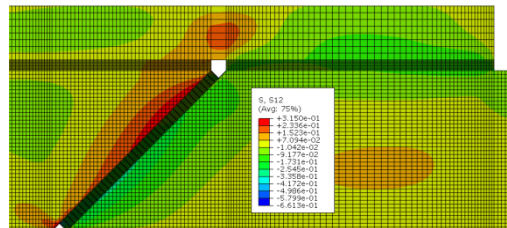


Figura 96 – Tensão de corte τ_{xy} , para a camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=45^\circ$ e $c=5$ mm.

Na Figura 97 ilustra-se a distribuição da tensão τ_{xy} para a camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=45^\circ$ e $c=10$ mm. Pela Figura 97 observam-se as mesmas zonas de concentração tensão que foram descritas para Figura 96.

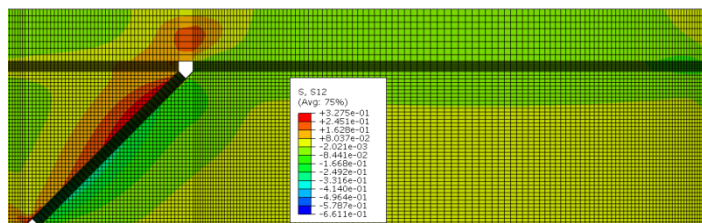


Figura 97 – Tensão de corte τ_{xy} , para a camada de adesivo do reforço exterior, com $\alpha=45^\circ$ e $c=10$ mm.

3. Tensão de corte τ_{xy} , para a camada de adesivo do reforço interior

Na Figura 98 apresentam-se as distribuições das tensões de corte τ_{xy} para a camada de adesivo do reforço interior (Figura 81), quando aplicável, e para $\alpha=10^\circ$.

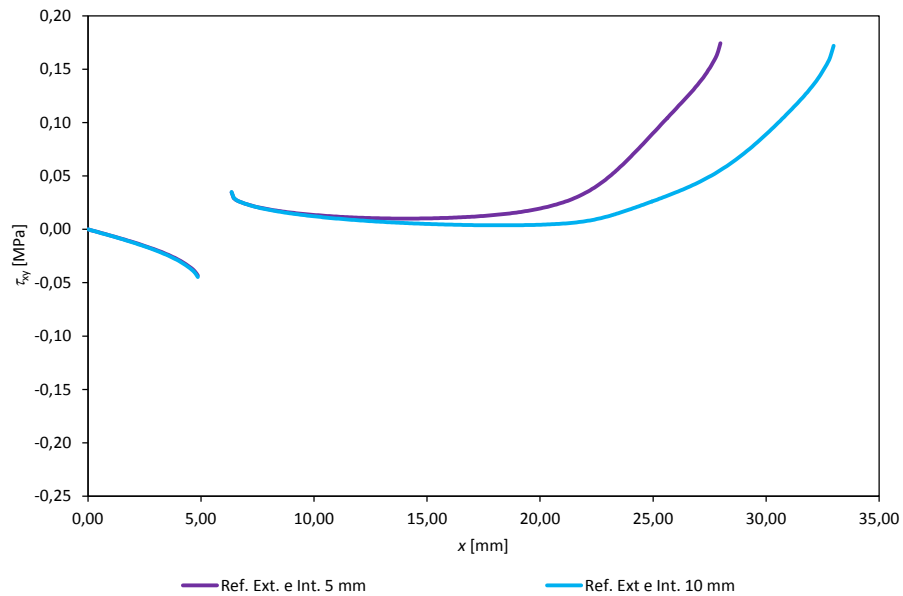


Figura 98 – Tensão de corte τ_{xy} , para a camada de adesivo do reforço interior, com $\alpha=10^\circ$ para as diferentes configurações.

Pela Figura 98 observa-se que, na porção da camada de adesivo do reforço interior antes da descontinuidade existe concentração de tensão. Para a porção da camada de adesivo do reforço interior a seguir à descontinuidade, a distribuição da tensão é praticamente uniforme e crescente até atingir o seu valor máximo que é na extremidade livre da camada de adesivo do reforço inferior. Na Figura 98 não se observa diferença do valor máximo da distribuição da tensão de corte quando comparados os dois valores de c em análise. Observam-se diferenças dos valores de tensão de corte obtidos para a extremidade livre da porção da camada de adesivo do reforço interior (ver Figura 98), relativamente ao reforço exterior (ver Figura 92). Observa-se um menor valor de τ_{xy} para $c=5$ mm na camada de adesivo do reforço interior do que para a camada de adesivo do reforço exterior. Para $\alpha=10^\circ$ e de acordo com a Figura 98, também se observa uma redução do valor de tensão de corte para $c=10$ mm em relação a $c=5$ mm para a porção da camada de adesivo a seguir à descontinuidade. Para a porção da camada de adesivo do reforço interior antes da descontinuidade os valores de τ_{xy} são semelhantes.

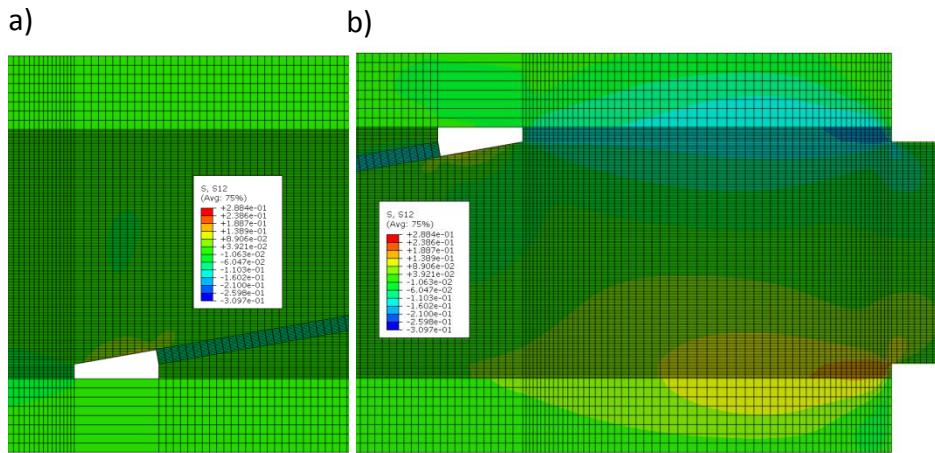


Figura 99 – Tensão de corte τ_{xy} , para a camada de adesivo do reforço exterior e interior, com $\alpha=10^\circ$ e $c=5$ mm, para a extremidade próxima do eixo de simetria (a) e para a extremidade afastada do eixo de simetria (b).

Na Figura 99 – (a) e (b) é ilustrada a distribuição da tensão τ_{xy} na camada de adesivo do reforço interior, com $\alpha=10^\circ$ e com $c=5$ mm. Pela Figura 99 – (b) observa-se concentração de tensões nas extremidades livres da camada de adesivo dos reforços. Estas concentrações de tensões são de valores opostos e isto ocorre devido à deflexão transversa, o que provoca deslizamento dos reforços em sentidos opostos relativamente aos substratos.

Na Figura 100 – (a) e (b) é ilustrada a distribuição da tensão τ_{xy} na camada de adesivo do reforço interior, com $\alpha=10^\circ$ e $c=10$ mm. Pela Figura 100 – (a) e (b) observam-se as mesmas zonas de concentração de tensão que foram descritas para Figura 99 – (a) e (b).

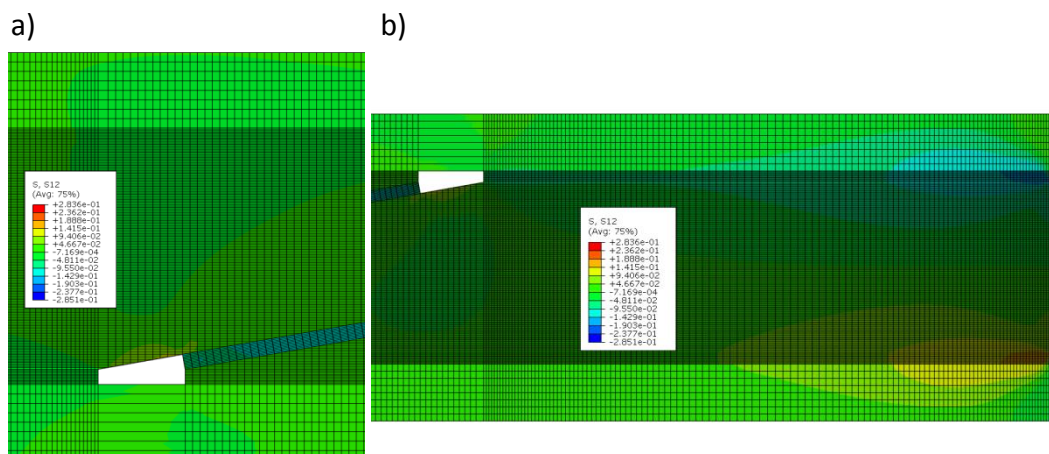


Figura 100 – Tensão de corte τ_{xy} , para a camada de adesivo do reforço exterior e interior, com $\alpha=10^\circ$ e $c=10$ mm, para a extremidade próxima do eixo de simetria (a) e para a extremidade afastada do eixo de simetria (b).

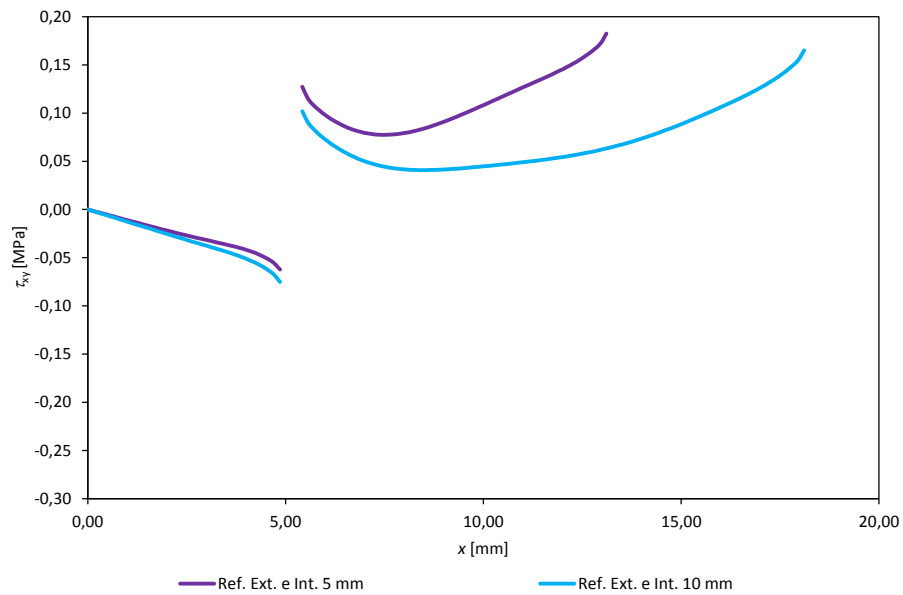


Figura 101 – Tensão de corte τ_{xy} , para a camada de adesivo do reforço interior, com $\alpha=45^\circ$ para as diferentes configurações.

Na Figura 101 apresentam-se as distribuições das tensões de corte τ_{xy} para a camada de adesivo do reforço interior, quando aplicável, e para $\alpha=45^\circ$. Pela Figura 101 observa-se praticamente o mesmo que já foi descrito para a Figura 98. Na Figura 102 é ilustrada a distribuição da tensão de corte τ_{xy} na camada de adesivo do reforço interior, com $\alpha=45^\circ$ e $c=5$ mm. Na Figura 103 é ilustrada a distribuição da tensão de corte τ_{xy} na camada de adesivo do reforço interior, com $\alpha=45^\circ$ e $c=10$ mm. Pela Figura 102 e Figura 103 observam-se as mesmas zonas de concentração de tensão que foram descritas para $\alpha=10^\circ$.

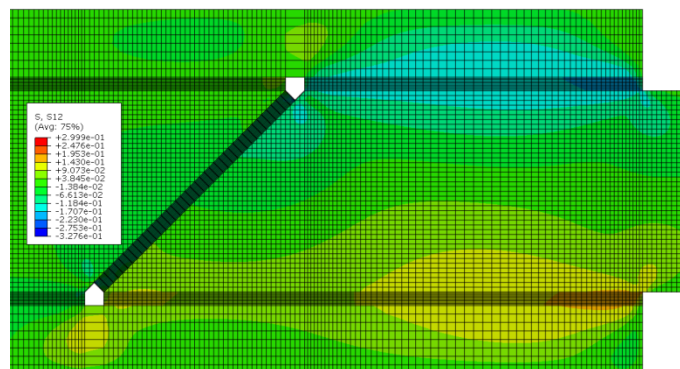


Figura 102 – Tensão de corte τ_{xy} , para a camada de adesivo do reforço exterior e interior, com $\alpha=45^\circ$ e $c=5$ mm.

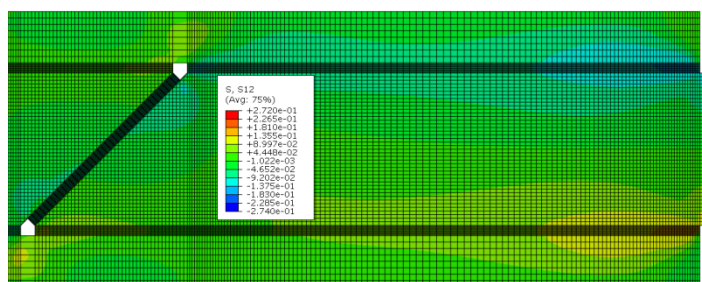


Figura 103 – Tensão de corte τ_{xy} para a camada de adesivo do reforço exterior e interior, com $\alpha=45^\circ$ e $c=10$ mm.

4.4. Previsão do comportamento das juntas 2D

Neste subcapítulo descreve-se o comportamento das reparações, quanto aos seus modos de rotura e resistência. Apresentam-se os gráficos com as curvas $P-\delta$, e comparam-se as diferentes configurações de reparação de modo a avaliar o seu desempenho e qual a melhor opção. Para o estudo da resistência da reparação foram consideradas todas as configurações anteriormente enunciadas e também o uso dos dois adesivos. No final é efetuada uma comparação entre o trabalho experimental e o numérico de forma a se poder validar os modelos numéricos elaborados ao longo deste trabalho.

4.4.1. Modo de rotura

A Tabela 11 apresenta os diferentes modos de rotura para todas as configurações de reparação em estudo. São também apresentadas algumas figuras, com configurações de reparação e utilização de adesivos diferentes, para ser mais fácil a interpretação da Tabela 11. Na Tabela 11 e nas colunas dos modos de rotura, quando se indica remendo quer dizer que a rotura iniciou-se pela camada de adesivo do remendo. Quando na mesma linha de reparações com um determinado α se indica reforço exterior e remendo, quer dizer que a rotura se iniciou praticamente ao mesmo tempo pela camada de adesivo do reforço exterior e pela camada de adesivo do remendo. Quando em reparações com um determinado α se indicam em linhas diferentes os componentes, quer dizer que primeiro aconteceu rotura no componente da primeira linha e que depois ocorreu rotura no outro componente.

Tabela 11 – Modos de rotura do para reparações com os adesivos Araldite® 2015 e AV138.

| α [°] | Configuração | Modo de rotura Adesivo Araldite® 2015 | Modo de rotura Adesivo Araldite® AV138 |
|--------------|--|---|---|
| 10 | Sem Reforço | Remendo | Remendo |
| | Reforço Exterior $c=5$ mm | Remendo Reforço exterior | Remendo e Reforço Exterior |
| | Reforço Exterior $c=10$ mm | Remendo Reforço Exterior | Remendo e Reforço Exterior |
| | Reforço Exterior e Interior $c=5$ mm | Reforço Exterior e Remendo Reforço Interior | Reforço Exterior e Remendo Reforço Interior |
| | Reforço Exterior e Interior $c=10$ mm | Remendo e Reforço Exterior Reforço Interior | Reforço Exterior e Remendo Reforço Interior |
| 15 | Sem Reforço | Remendo | Remendo |
| | Reforço Exterior $c=5$ mm | Remendo Reforço exterior | Remendo e Reforço Exterior |
| | Reforço Exterior $c=10$ mm | Remendo Reforço exterior | Remendo Reforço Exterior |
| | Reforço Exterior e Interior $c=5$ mm | Remendo e Reforço Exterior Reforço Interior | Reforço Exterior e Remendo Remendo Interior |
| | Reforço Exterior e Interior $c=10$ mm | Remendo e Reforço Exterior Reforço Interior | Remendo Reforço Exterior Reforço Interior |
| 20 | Sem Reforço | Remendo | Remendo |
| | Reforço Exterior $c=5$ mm | Remendo Reforço Exterior | Remendo e Reforço Exterior |
| | Reforço Exterior $c=10$ mm | Remendo Reforço Exterior | Remendo Reforço Exterior |
| | Reforço Exterior e Interior $c=5$ mm | Remendo e Reforço Exterior Reforço Interior | Remendo e Reforço Exterior Remendo Interior |
| | Reforço Exterior e Interior $c=10$ mm | Remendo e Reforço Exterior Reforço Interior | Remendo e Reforço Exterior Remendo Interior |
| 30 | Sem Reforço | Remendo | Remendo |
| | Reforço Exterior $c=5$ mm | Remendo Reforço Exterior | Remendo Reforço Exterior |
| | Reforço Exterior $c=10$ mm | Remendo Reforço Exterior | Remendo Reforço Exterior |
| | Reforço Exterior e Interior $c=5$ mm | Remendo Reforço Exterior Reforço Interior | Remendo e Reforço Exterior Remendo Interior |
| | Reforço Exterior e Interior $c=10$ mm | Remendo Reforço Exterior Reforço Interior | Remendo Reforço Exterior Reforço Interior |
| 45 | Sem Reforço | Remendo | Remendo |
| | Reforço Exterior $c=5$ mm | Remendo Reforço Exterior | Remendo Reforço Exterior |
| | Reforço Exterior $c=10$ mm | Remendo Reforço Exterior | Remendo Reforço Exterior |
| | Reforço Exterior e Interior $c=5$ mm | Remendo Reforço Exterior Reforço Interior | Remendo Reforço Exterior Reforço Interior |
| | Reforço Exterior e Interior $c=10$ mm | Remendo Reforço Exterior Reforço Interior | Remendo Reforço Exterior Reforço Interior |

Para os modos de rotura e visualização da degradação da camada de adesivo usa-se o parâmetro SDEG do *software* ABAQUS®. Este parâmetro permite avaliar a degradação dos elementos coesivos presentes na camada de adesivo e a sua propagação ao longo da mesma. Um SDEG de valor 0 indica que o elemento coesivo em causa não sofreu degradação e para um SDEG com o valor 1 indica que o elemento coesivo em causa se encontra 100 % degradado.

A Figura 104 representa um modelo de reparação, com $\alpha=10^\circ$, $c=5$ mm e reforço exterior e interior, onde se observa que a rotura se iniciou praticamente ao mesmo tempo pela camada de adesivo do reforço exterior e pela camada de adesivo do remendo, pois em ambas as camadas se verifica um SDEG=1. Pela análise das tensões previamente efetuada, observam-se picos de tensão de arrancamento nas extremidades da camada de adesivo do remendo (ver Figura 72). Para a camada de adesivo do reforço exterior observam-se picos de tensão de arrancamento próximo da extremidade livre do reforço (ver Figura 75) e para a camada de adesivo do reforço interior também se observam picos de tensão de arrancamento na extremidade livre do reforço (ver Figura 82). Em ambas as camadas de reforços observam-se picos de tensão praticamente com o mesmo valor absoluto. Relativamente às tensões de corte pela Figura 88, observam-se picos de tensão nas extremidades da camada de adesivo do remendo. Sobre as camadas de adesivo dos reforços também se observam picos de tensão de corte nas extremidades livres do reforço, mas para a camada de adesivo do reforço interior (ver Figura 92) observam-se valores menores de tensão comparativamente com os valores obtidos para a camada de adesivo do reforço exterior (ver Figura 98). Pela Figura 104 observa-se que a rotura inicia-se pela camada de adesivo do remendo e do reforço exterior, algo que é explicado pela análise das tensões de corte, pois existe variação dos valores do pico das tensões, enquanto nas tensões de arrancamento os valores do pico das tensões são praticamente idênticos.

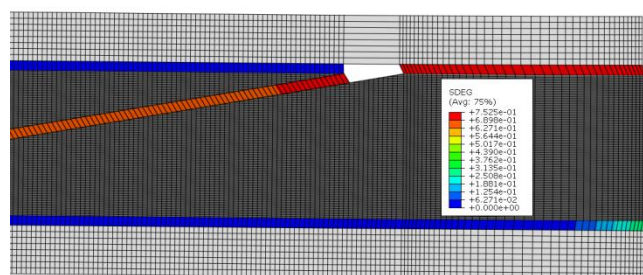


Figura 104 – Reparação com $\alpha=10^\circ$, $c=5$ mm e reforço exterior e interior (Araldite® 2015).

Na Figura 105 apresenta-se um modelo de reparação, com $\alpha=45^\circ$, $c=10$ mm e só com reforço exterior. A Figura 104 e Figura 105 são representativas para os casos de reparações com $\alpha=10^\circ$ e 45° . Pela Figura 105 observa-se que a rotura inicia-se pela extremidade livre da camada de adesivo do remendo. A rotura inicia-se por esta extremidade pois é nessa região que se observam os maiores valores dos picos de tensão de corte (ver Figura 90).

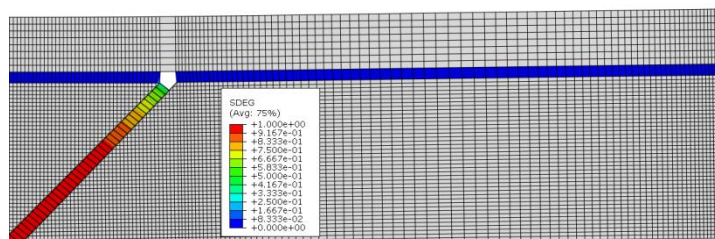


Figura 105 – Reparação com $\alpha=45^\circ$, $c=10$ mm e só com reforço exterior (Araldite® 2015).

A Figura 106 representa um modelo de reparação, com $\alpha=10^\circ$, $c=5$ mm e só com reforço exterior. Pela Figura 106 observa-se que a rotura inicia-se pela extremidade livre da camada de adesivo do remendo, é por esta camada e extremidade que se inicia a rotura pois é nessa região que se observam os maiores valores dos picos de tensão de corte (ver Figura 95).

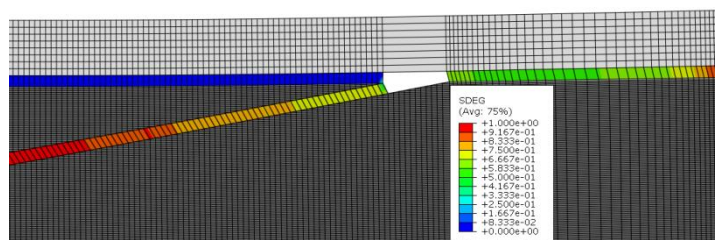


Figura 106 – Reparação com $\alpha=10^\circ$, $c=5$ mm e só com reforço exterior (Araldite® AV138).

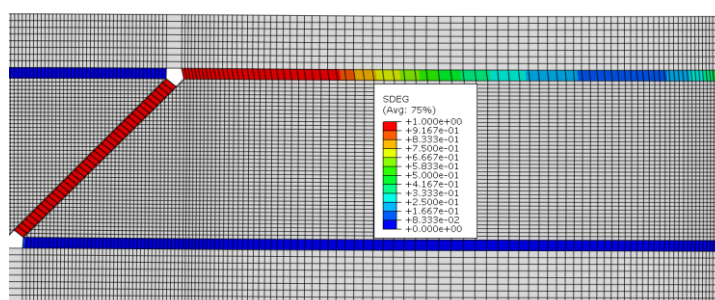


Figura 107 – Reparação com $\alpha=45^\circ$, $c=10$ mm e com reforço exterior e interior (Araldite® AV138).

Na Figura 107 apresenta-se um modelo de reparação, com $\alpha=45^\circ$, $c=10$ mm e com reforço exterior e interior. Pela Figura 107 observa-se que a rotura se inicia praticamente em simultâneo pela camada de adesivo do remendo e pela camada de adesivo do reforço exterior. Pela análise de tensões efetuada anteriormente os picos de tensão de

arrancamento observados para ambas as extremidades das camadas de adesivo dos reforços são praticamente de valores semelhantes (ver Figura 78 e Figura 85). Pelas tensões de corte observam-se concentrações de tensão nas extremidades da camada de adesivo do remendo, sendo o valor mais elevado obtido na extremidade da camada de adesivo do remendo próximo do reforço exterior (ver Figura 90). Para as camadas dos reforços os valores mais elevados da tensão foram observados nas extremidades livres dos reforços e são praticamente de valor idêntico, tanto para o reforço exterior como interior (ver Figura 95 e Figura 101).

4.4.2. Curvas $P-\delta$

Neste subcapítulo apresentam-se os gráficos com as curvas $P-\delta$ para as reparações com $\alpha=10^\circ$ e 45° para os adesivos Araldite® 2015 e Araldite® AV138. No Apêndice 5 e no Apêndice 6 apresentam-se as curvas $P-\delta$ para valores de $\alpha=15^\circ$, 20° e 30° . Na Figura 108 apresentam-se as curvas $P-\delta$ para reparações com o adesivo Araldite® 2015 e $\alpha=10^\circ$. A fase final das curvas $P-\delta$ indicam a degradação da camada de adesivo.

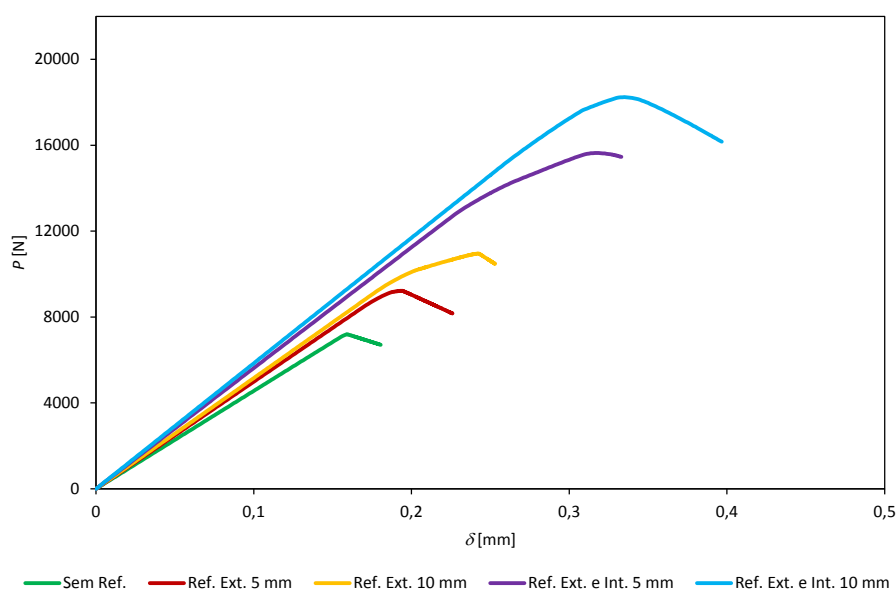


Figura 108 – Curvas $P-\delta$ numéricas para $\alpha=10^\circ$ e adesivo Araldite® 2015.

Pela Figura 108 observa-se que existe um aumento de resistência da reparação com a aplicação de reforços e também com o aumento de c . Torna-se também evidente que existe um aumento da resistência da reparação quando se utiliza tanto reforço exterior e interior comparativamente com a utilização de apenas reforços exteriores. Deve-se também referir

que a rigidez da reparação é praticamente constante, mas varia com o tipo de reforço até ser atingida a carga máxima e os deslocamentos são lineares. Na Figura 109 apresentam-se as curvas $P-\delta$ para reparações em que se utiliza o adesivo Araldite® 2015 e $\alpha=45^\circ$.

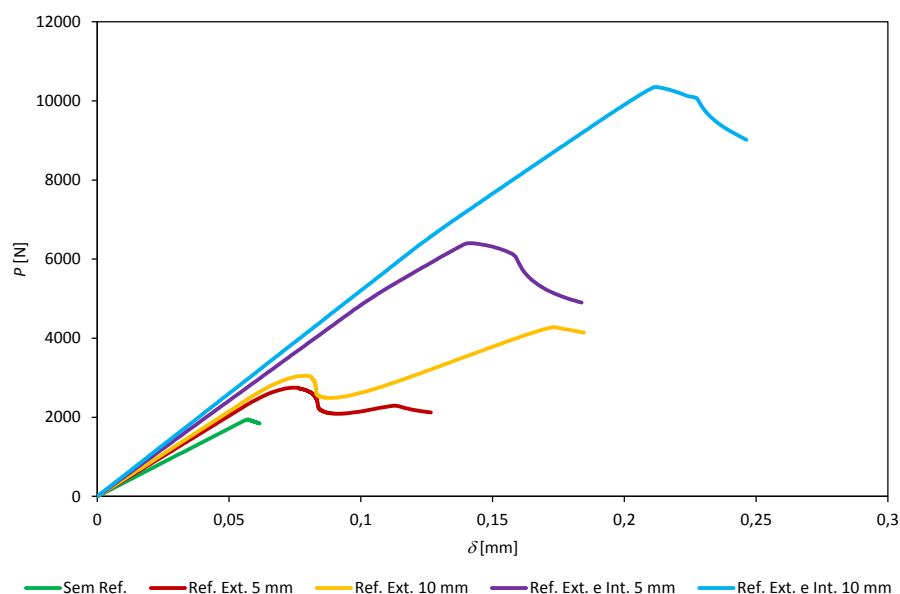


Figura 109 – Curva $P-\delta$ numérica para $\alpha=45^\circ$ e adesivo Araldite® 2015.

Pela Figura 109 observa-se praticamente o mesmo que foi descrito para a Figura 108 com a diferença que se observam valores inferiores de carga máxima, o que era de esperar pois com valores maiores α obtêm-se valores de resistência da reparação menores. Quando se utiliza apenas reforço exterior, verifica-se que existem dois patamares de resistência da reparação. Primeiro ocorre rotura na camada de adesivo do remendo e só depois é que ocorre a rotura da camada de adesivo do reforço. Este acontecimento torna-se mais evidente para o caso de ser aplicado reforço exterior com $c=10$ mm, em que a resistência máxima da junta é superior ao valor obtido para a rotura da camada de adesivo do remendo. Na Figura 110 apresenta-se a curva $P-\delta$ para reparações em que se utiliza o adesivo Araldite® AV138 e $\alpha=10^\circ$. Pela Figura 110 observa-se que existe um aumento de resistência da reparação com a aplicação de reforços e também que existe um aumento de resistência com o aumento de c . Os valores de carga máxima obtidos para este caso são superiores do que os valores observados na Figura 108. Deve-se também referir que a rigidez da reparação é constante e que neste caso através dos deslocamentos observa-se uma rotura frágil da reparação pois após ser atingida a carga máxima observou-se queda repentina da carga, que corresponde a uma rotura catastrófica.

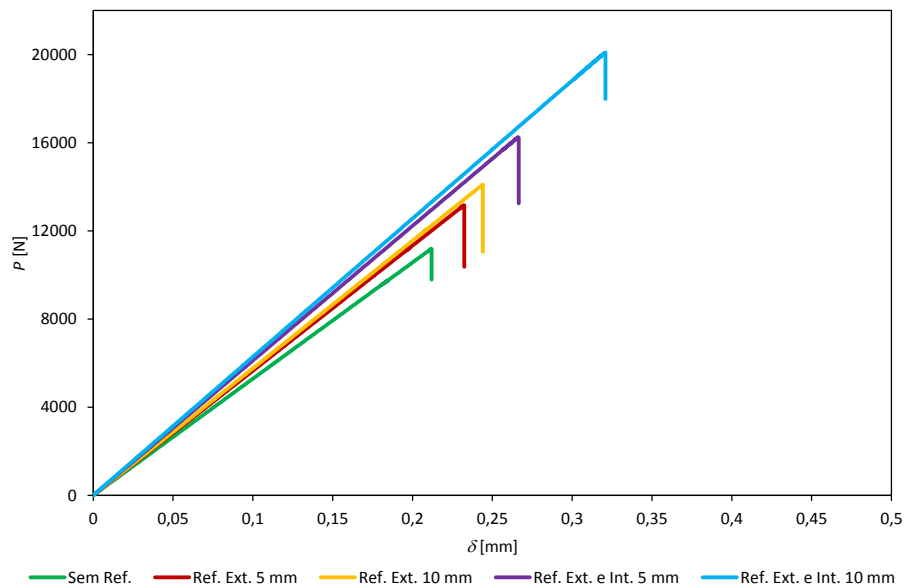


Figura 110 – Curva P – δ numérica para $\alpha=10^\circ$ e adesivo Araldite® AV138.

Na Figura 111 apresentam-se as curvas P – δ para reparações em que se utiliza o adesivo Araldite® AV138 e $\alpha=10^\circ$.

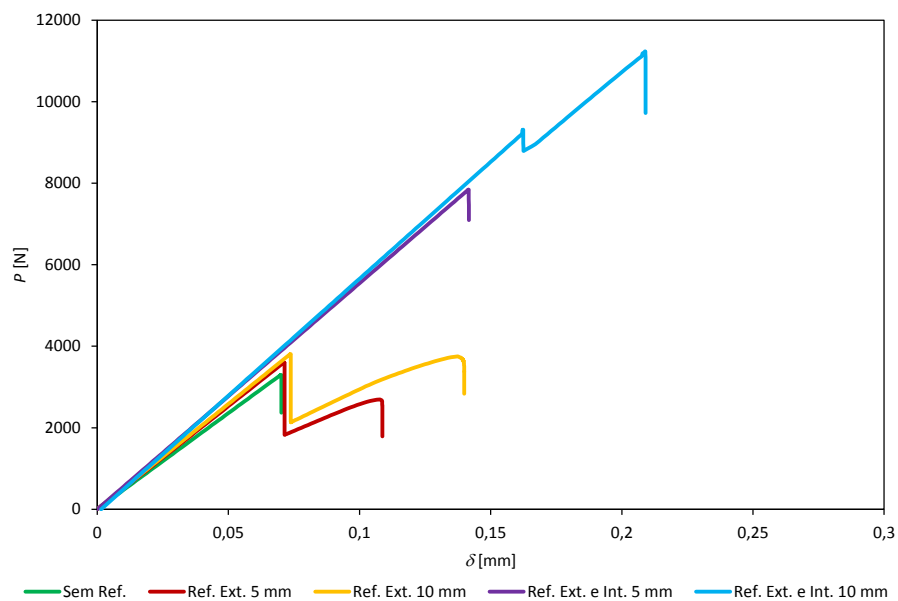


Figura 111 – Curva P – δ numérica para $\alpha=45^\circ$ e adesivo Araldite® AV138.

Pela Figura 111 observa-se o praticamente o mesmo que foi descrito para a Figura 110, sendo a grande diferença observada a redução dos valores de carga máxima. No caso de ter sido utilizado apenas reforço exterior, verifica-se que existem dois patamares de resistência da reparação, sendo o primeiro patamar correspondente à rotura da camada de adesivo do remendo e respetiva carga máxima da reparação, e o segundo patamar correspondente à

rotura da camada de adesivo do reforço onde se observa um menor valor do que o valor da carga máxima. Para este caso, também se verifica que o aumento da resistência da reparação foi ligeiro. Na reparação com $\alpha=45^\circ$ e $c=10$ mm também se observam dois patamares de resistência, em que o primeiro corresponde à carga máxima suportada pela camada de adesivo do remendo e o segundo corresponde à carga máxima do reforço exterior, sendo neste segundo patamar que se observa o maior valor de carga máxima suportado pela reparação. Em termos de rigidez é observado exatamente o mesmo que foi descrito para a Figura 110.

4.4.3. Resistência das reparações

Neste ponto são apresentados os gráficos com o valor de $P_{\text{máx}}$ e de melhoria percentual da resistência da reparação em percentagem (η) em função de α e configuração de reparação. Na Figura 112 – (a) apresentam-se os valores de $P_{\text{máx}}$ em função de α e na Figura 112 – (b) apresentam-se os valores de η em função de α para o adesivo Araldite® 2015.

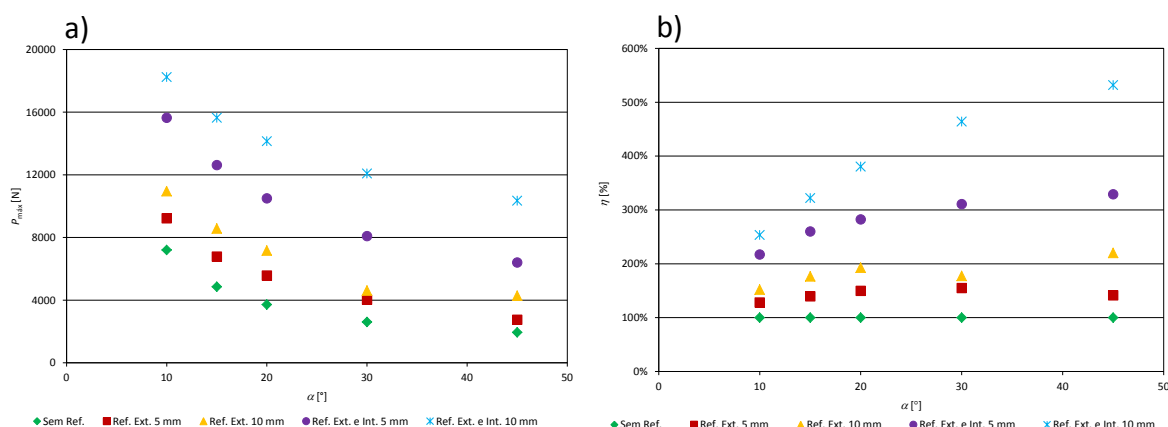


Figura 112 – Comparação de $P_{\text{máx}}$ (a) e de η (b) para o adesivo Araldite® 2015.

Pela Figura 112 – (a) observa-se um aumento exponencial dos valores de $P_{\text{máx}}$ com a diminuição de α [68 e 69]. Obteve-se para as reparações com $c=10$ mm melhores resultados do que para as reparações com $c=5$ mm, pois quanto maior for o valor de c maior é a área colada nos reforços, e como também já descrito anteriormente, quanto maior é a área colada maior é a resistência da reparação. O valor mais elevado de $P_{\text{máx}}$ ($\approx 18\text{kN}$) foi obtido para a reparação com $\alpha=10^\circ$, $c=10$ mm e com a utilização de reforço exterior e interior. Pela Figura 112 – (b) observam-se melhorias ao nível do rendimento das reparações acima dos 500 %, para $\alpha=45^\circ$, $c=10$ mm e utilização de reforço exterior e interior. Os valores de η

aumentam gradualmente com a diminuição de α pois pela análise de tensões observa-se uma diminuição do valor médio das tensões de corte com o aumento de α juntamente com aplicação de reforços (ver Figura 88 e Figura 90) e também pela questão da área. Na Figura 113 – (a) apresentam-se os valores de $P_{\text{máx}}$ em função de α e na Figura 113 – (b) apresentam-se os valores de η em função de α para o adesivo Araldite® AV138.

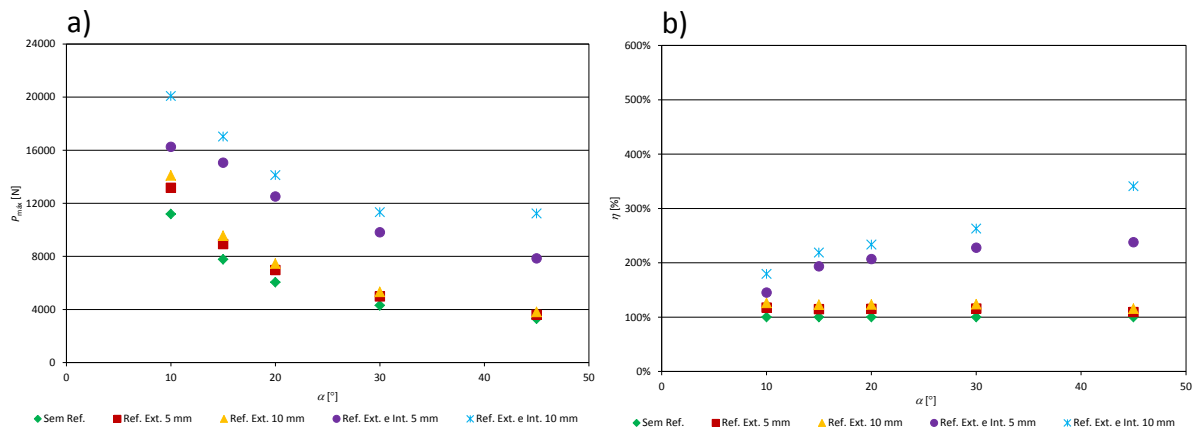


Figura 113 – Comparação de $P_{\text{máx}}$ (a) e de η (b) para o adesivo Araldite® AV138.

Pela Figura 113 – (a) também se observa um aumento exponencial dos valores de $P_{\text{máx}}$ com a diminuição de α como o descrito para a Figura 112 – (a). Também se observa que para o caso de não serem aplicados quaisquer reforços o adesivo Araldite® AV138 apresenta maior resistência do que o adesivo Araldite® 2015, porque apesar do adesivo Araldite® AV138 ter um comportamento frágil, tem maior resistência e como as tensões são praticamente constantes, o que governa os valores de $P_{\text{máx}}$ é a resistência e não a ductilidade, como acontece por exemplo nas juntas de sobreposição simples [114]. As reparações que obtiveram melhores resultados foram aquelas em que se utilizaram reforços exteriores e interiores, com menores valores de α e $c=10$ mm. O valor mais elevado de $P_{\text{máx}}$ (≈ 20 kN) foi obtido para a reparação com $\alpha=10^\circ$, $c=10$ mm e reforço exterior e interior. Na Figura 113 – (b) observam-se melhorias ao nível do rendimento das reparações acima dos 300 %, para $\alpha=45^\circ$, $c=10$ mm e utilização tanto de reforço exterior e interior. Estes aumentos devem-se ao que já foi descrito anteriormente para a Figura 112 – (b). A seguir apresenta-se a Tabela 12, com os valores de $P_{\text{máx}}$ e de η para cada uma das configurações de reparação e cada um dos adesivos analisados.

Tabela 12 – Valores de $P_{\text{máx}}$ e η para cada configuração.

| α [°] | Configuração | Araldite® 2015 | | Araldite® AV138 | |
|--------------|---------------------------------------|----------------------|------------|----------------------|------------|
| | | $P_{\text{máx}}$ [N] | η [%] | $P_{\text{máx}}$ [N] | η [%] |
| 10 | Sem Reforço | 7199,19 | 100 | 11186,90 | 100 |
| | Reforço Exterior $c=5$ mm | 9222,10 | 128 | 13164,60 | 118 |
| | Reforço Exterior $c=10$ mm | 10954,70 | 152 | 14099,40 | 126 |
| | Reforço Exterior e Interior $c=5$ mm | 15636,90 | 217 | 16252,60 | 145 |
| | Reforço Exterior e Interior $c=10$ mm | 18237,40 | 253 | 20085,90 | 180 |
| 15 | Sem Reforço | 4856,81 | 100 | 7778,90 | 100 |
| | Reforço Exterior $c=5$ mm | 6783,10 | 140 | 8925,23 | 115 |
| | Reforço Exterior $c=10$ mm | 8575,25 | 177 | 9556,23 | 123 |
| | Reforço Exterior e Interior $c=5$ mm | 12625,50 | 260 | 15056,40 | 194 |
| | Reforço Exterior e Interior $c=10$ mm | 15641,40 | 322 | 17023,90 | 219 |
| 20 | Sem Reforço | 3717,69 | 100 | 6049,91 | 100 |
| | Reforço Exterior $c=5$ mm | 5567,24 | 150 | 6973,79 | 115 |
| | Reforço Exterior $c=10$ mm | 7164,52 | 193 | 7463,97 | 123 |
| | Reforço Exterior e Interior $c=5$ mm | 10501,40 | 282 | 12511,80 | 207 |
| | Reforço Exterior e Interior $c=10$ mm | 14140,80 | 380 | 14124,20 | 233 |
| 30 | Sem Reforço | 2603,33 | 100 | 4309,14 | 100 |
| | Reforço Exterior $c=5$ mm | 4031,23 | 155 | 4991,46 | 116 |
| | Reforço Exterior $c=10$ mm | 4615,60 | 177 | 5330,58 | 124 |
| | Reforço Exterior e Interior $c=5$ mm | 8089,94 | 311 | 9815,03 | 228 |
| | Reforço Exterior e Interior $c=10$ mm | 12083,50 | 464 | 11331,90 | 263 |
| 45 | Sem Reforço | 1946,08 | 100 | 3298,11 | 100 |
| | Reforço Exterior $c=5$ mm | 2751,07 | 141 | 3603,95 | 109 |
| | Reforço Exterior $c=10$ mm | 4281,04 | 220 | 3809,31 | 115 |
| | Reforço Exterior e Interior $c=5$ mm | 6403,23 | 329 | 7847,56 | 238 |
| | Reforço Exterior e Interior $c=10$ mm | 10349,80 | 532 | 11237,10 | 341 |

4.5. Comparação do trabalho numérico com o experimental

Neste subcapítulo efetua-se uma comparação entre os resultados obtidos na análise experimental com os resultados obtidos na análise numérica. Como na análise experimental só foram consideradas reparações com o adesivo Araldite® 2015 e $c=5$ mm, apenas estas configurações vão ser estudadas (com as três tipologias de reforço: sem reforço, somente exterior, e exterior e interior). No Apêndice 7 apresenta-se a comparação entre o trabalho numérico com o experimental para as configurações de reparação com $\alpha=15^\circ$, 20° e 30° . Esta comparação é efetuada para se validar os modelos utilizados na análise numérica e os resultados obtidos em termos de conclusões qualitativas, no que concerne ao efeito das diferentes tipologias de reparação, e resultados posteriores de alteração geométrica para otimização das reparações. Na Figura 114 – (a) apresenta-se a comparação das cinco curvas $P-\delta$ obtidas pela análise experimental com a curva $P-\delta$ obtida pela análise numérica, para reparações com $\alpha=10^\circ$, $c=5$ mm e utilização apenas de reforço exterior e na Figura 114 – (b) efetua-se a comparação das cinco curvas $P-\delta$ obtidas pela análise experimental com a curva $P-\delta$ obtida pela análise numérica, para reparações com $\alpha=10^\circ$, $c=5$ mm e com a utilização de reforço exterior e interior.

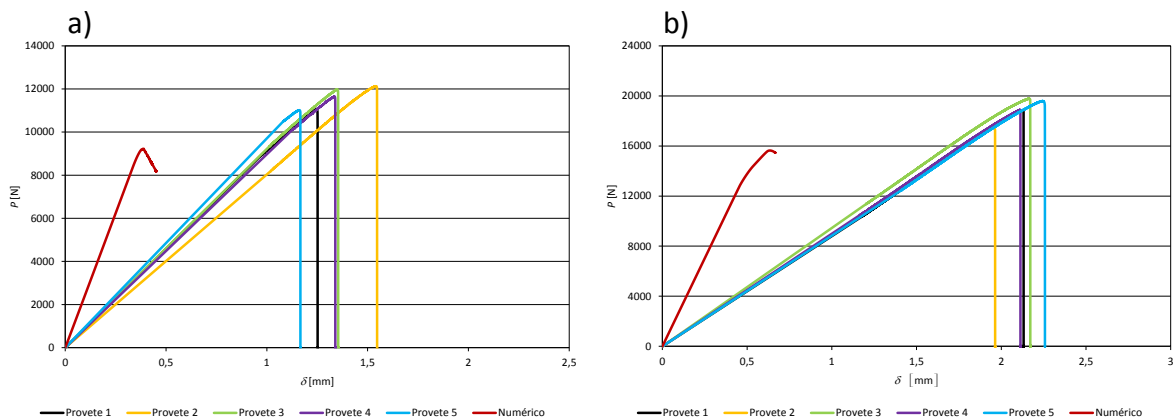


Figura 114 – Curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas para $\alpha=10^\circ$, $c=5$ mm e reforço exterior (a) e com reforço exterior e interior (b).

Na Figura 115 – (a) apresenta-se a comparação das cinco curvas $P-\delta$ obtidas pela análise experimental com a curva $P-\delta$ obtida pela análise numérica, para reparações com $\alpha=45^\circ$, $c=5$ mm e utilização apenas de reforço exterior e na Figura 115 – (b) apresenta-se a comparação das cinco curvas $P-\delta$ obtidas pela análise experimental com a curva $P-\delta$ obtida

pela análise numérica, para reparações com $\alpha=45^\circ$, $c=5$ mm e com a utilização de reforço exterior e interior.

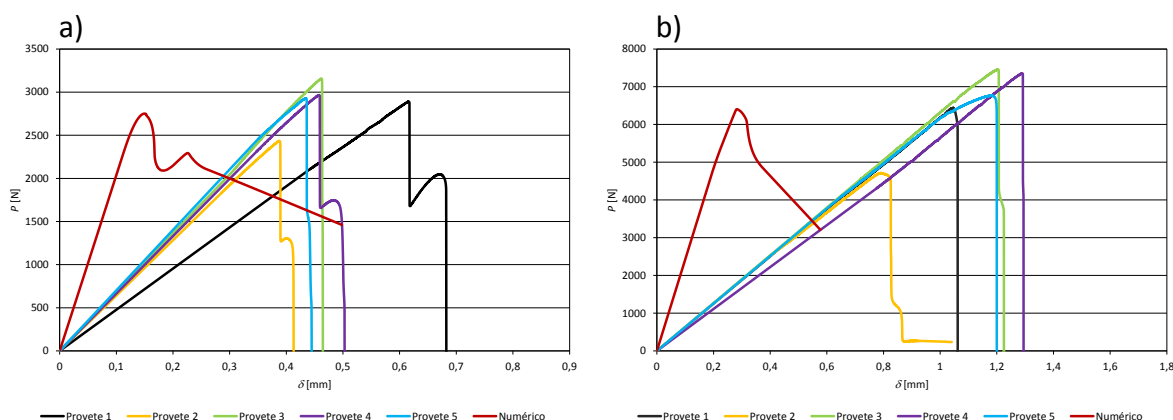


Figura 115 – Curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas para $\alpha=45^\circ$, $c=5$ mm e reforço exterior (a) e com reforço exterior e interior (b).

Observam-se pela Figura 114 – (a) e (b) como pela Figura 115 – (a) e (b), diferenças ao nível da rigidez e do deslocamento de rotura das reparações. Também se observam diferenças em termos da resistência das reparações embora muito menores em termos relativos. Deve-se salientar que a rigidez da reparação na análise numérica é superior à rigidez da reparação na análise experimental. Estas diferenças observadas entre a análise experimental e numérica são provocadas por pequenos escorregamentos entre os provetes e as amarras durante o carregamento de tração, e também devido a flexibilidade do sistema de amarração [9]. Pela Figura 114 – (a) e (b), e pela Figura 115 – (a) e (b), para a maior parte das configurações de reparação observa-se que o valor de $P_{\text{máx}}$ para o trabalho numérico é inferior aos valores médios obtidos de $P_{\text{máx}}$ para o trabalho experimental. No entanto, como a diferença máxima é de aproximadamente 25 % para a reparação com $\alpha=10^\circ$, $c=5$ mm e com a utilização de reforço exterior. Para a reparação com $\alpha=45^\circ$, $c=5$ mm e com a utilização de reforço exterior e interior a diferença máxima é de aproximadamente 10 %. O modelo simula com uma precisão razoável o comportamento da resistência da reparação através de simulação numérica no *software* ABAQUS®. Na Figura 116 apresenta-se a comparação dos valores de $P_{\text{máx}}$ da análise numérica com as médias dos valores de $P_{\text{máx}}$ da análise experimental e os respetivos desvios padrão.

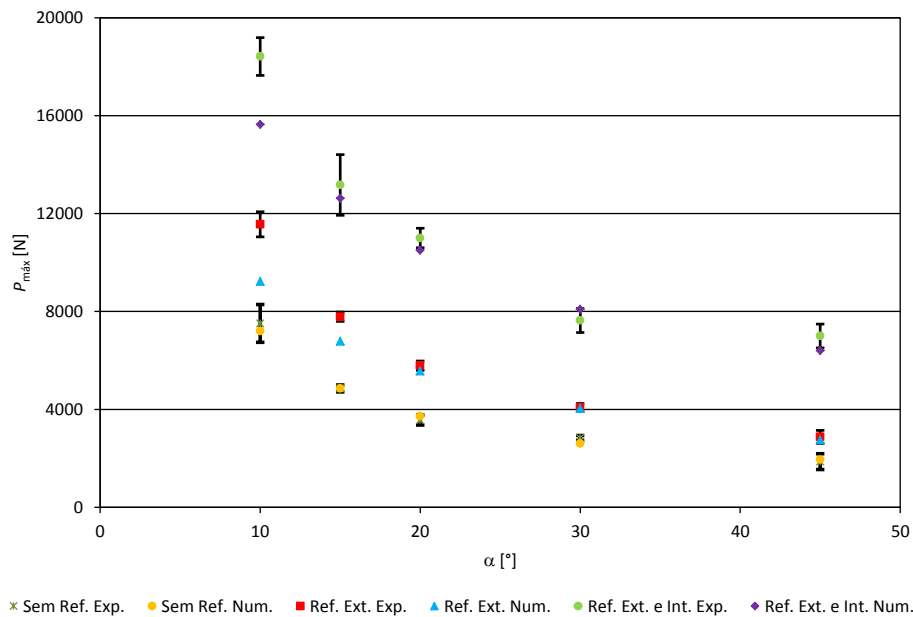


Figura 116 – Comparação dos valores de $P_{\text{máx}}$ da análise numérica com as médias dos valores de $P_{\text{máx}}$ da análise experimental e respectivos desvios padrão.

Pela Figura 116 observa-se que para valores de α mais pequenos, o valor de $P_{\text{máx}}$ numérico se encontra fora da média dos valores de $P_{\text{máx}}$ experimentais e da tolerância de \pm o desvio padrão. Para valores de α mais elevados o valor de $P_{\text{máx}}$ numérico se encontra dentro da tolerância de \pm o desvio padrão obtido pela média dos valores de $P_{\text{máx}}$ experimentais. De seguida apresenta-se a Tabela 13, onde se efetua a comparação em % da diferença entre os resultados obtidos na análise numérica com a média dos resultados obtidos na análise experimental. Esta comparação é efetuada através do quociente dos resultados da análise numérica pela média dos resultados obtidos na análise experimental. Pela Tabela 13 observa-se que de um modo geral os resultados obtidos na análise numérica são inferiores aos resultados obtidos na análise experimental, com a exceção das seguintes configurações, $\alpha=20^\circ$ sem a utilização de reforços e $\alpha=30^\circ$ com a utilização de reforços exterior e interior. Pela tabela também se observa que a maior diferença obtida na comparação entre resultados é de $\approx 25,4\%$ para $\alpha=10^\circ$ e utilização de reforço exterior.

Tabela 13 – Comparação em % da diferença entre os resultados obtidos pela análise numérica com os resultados obtidos pela análise experimental.

| Angulo remendo α [°] | Configuração | Análise Exp. $P_{\text{máx}}$ [N] | Análise Num. $P_{\text{máx}}$ [N] | [%] |
|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------|
| 10 | Sem Reforço | 7509,33 ± 772,05 | 7199,19 | 4,3 % |
| | Reforço Exterior | 11561,26 ± 514,42 | 9222,10 | 25,4 % |
| | Reforço Exterior e Interior | 18416,65 ± 774,75 | 15636,90 | 17,8 % |
| 15 | Sem Reforço | 4857,96 ± 141,93 | 4856,81 | 0,0 % |
| | Reforço Exterior | 7784,93 ± 193,38 | 6783,10 | 14,8 % |
| | Reforço Exterior e Interior | 13167,04 ± 1239,07 | 12625,50 | 4,3 % |
| 20 | Sem Reforço | 3567,00 ± 205,56 | 3717,69 | 4,1 % |
| | Reforço Exterior | 5788,89 ± 191,50 | 5567,24 | 4,0 % |
| | Reforço Exterior e Interior | 10999,36 ± 398,79 | 10501,40 | 4,7 % |
| 30 | Sem Reforço | 2831,70 ± 101,03 | 2603,33 | 8,8 % |
| | Reforço Exterior | 4080,92 ± 165,20 | 4031,23 | 1,2 % |
| | Reforço Exterior e Interior | 7635,37 ± 490,90 | 8089,94 | 5,6 % |
| 45 | Sem Reforço | 1867,56 ± 325,56 | 1946,08 | 4,0 % |
| | Reforço Exterior | 2875,02 ± 267,01 | 2751,07 | 4,5 % |
| | Reforço Exterior e Interior | 7002,39 ± 484,17 | 6403,23 | 9,4 % |

4.6. Alteração da geometria para melhoria do desempenho da reparação

Neste capítulo é apresentado um estudo puramente numérico de modo a poder efetuar-se uma análise mais detalhada deste tipo de reparação e consideram-se duas alterações geométricas. A primeira será a alteração da espessura do reforço e a segunda será a introdução de um pequeno chanfro com um ângulo de 15° (ver Figura 117) nas extremidades dos reforços a cobrir a totalidade da espessura do remendo, de modo a minimizar a perturbação aerodinâmica introduzida com a aplicação de reforços.

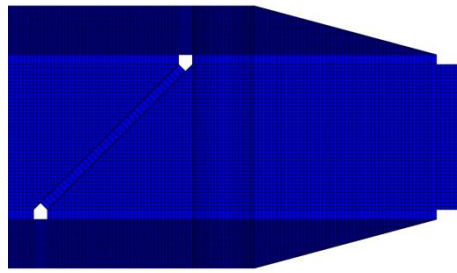


Figura 117 – Pormenor malha do chanfro de 15° aplicado na extremidade dos reforços.

Em ambos os casos só se realiza o estudo para as configurações de reparação com $\alpha=10^\circ$ e 45° e $c=5$ mm, cujos valores de α são os valores limites do estudo anteriormente realizado, correspondentes também aos valores máximo e mínimo de resistência. Neste estudo apenas se efetua a análise da distribuição das tensões para o adesivo Araldite® 2015, pois como anteriormente descrito no subcapítulo 4.4, existe semelhança entre os dois adesivos no regime elástico [114].

4.6.1. Alteração da espessura dos reforços

Em primeiro lugar apresenta-se a análise das tensões de arrancamento e de corte e em seguida apresentam-se as curvas $P-\delta$ e a resistência das reparações para os adesivos Araldite® 2015 e Araldite® AV138.

1. Tensões de arrancamento

Em primeiro lugar apresentam-se as tensões σ_y para reparações com o adesivo Araldite® 2015 e $\alpha=10^\circ$, e em segundo lugar para reparações com $\alpha=45^\circ$. Na Figura 118 – (a) apresentam-se as distribuições das tensões σ_y para a camada de adesivo da reparação e na Figura 118 – (b) apresentam-se as distribuições das tensões σ_y para a camada de adesivo do reforço exterior e na Figura 118 – (c) apresentam-se as distribuições das tensões σ_y para a camada de adesivo do reforço interior, com $\alpha=10^\circ$ e com a variação da espessura dos reforços. Para melhor identificação das camadas de adesivo em análise ver Figura 69, Figura 74 e Figura 81.

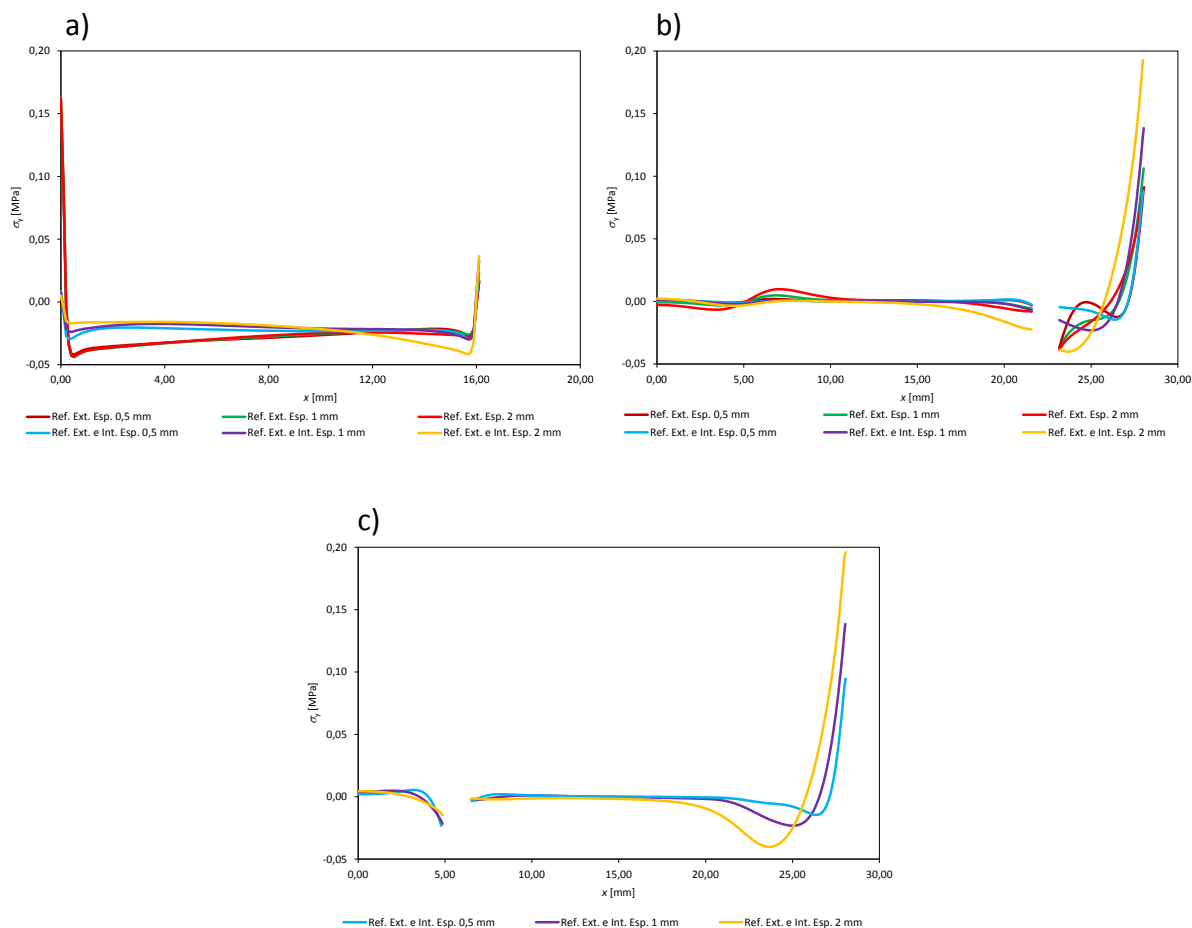


Figura 118 – Tensão de arrancamento σ_y , com $\alpha=10^\circ$ para as diferentes configurações e variação de espessura dos reforços, da camada de adesivo do remendo (a), do reforço exterior (b) e do reforço interior (c).

Na Figura 118 – (a), (b) e (c) observam-se distribuições de tensões idênticas aos observados anteriormente no subcapítulo 4.3.1, no entanto deve-se referir que pela Figura 118 – (a) observa-se que para a configuração de reparação em que se utiliza apenas reforço exterior a distribuição de tensão para a camada de adesivo do remendo, para os três casos de variação da espessura do reforço, é praticamente idêntica. Pela Figura 118 – (a) e para a configuração de reparação em que se utiliza reforço exterior e interior, observa-se que na extremidade da camada de adesivo do remendo perto do eixo de simetria os valores da tensão de arrancamento diminuem e na outra extremidade os valores da tensão aumentam com o aumento da espessura dos reforços devido ao aumento da rigidez da reparação. Pela Figura 118 – (b) e (c) observa-se que para as camadas de adesivo dos reforços, tanto exterior como interior, observa-se que à medida que a espessura dos reforços aumenta, também aumenta o pico de tensão na extremidade livre dessas camadas de adesivo. Estes aumentos dos valores da tensão indicam que se potenciará a rotura prematura da reparação.

Apresentam-se na Figura 119 as distribuições de tensões σ_y com $\alpha=45^\circ$ e com a variação da espessura dos reforços, para a camada de adesivo do remendo (a), para a camada de adesivo do reforço exterior (b) e para a camada de adesivo do remendo interior (c). Para uma melhor interpretação das camadas de adesivo em análise ver Figura 69, Figura 74 e Figura 81.

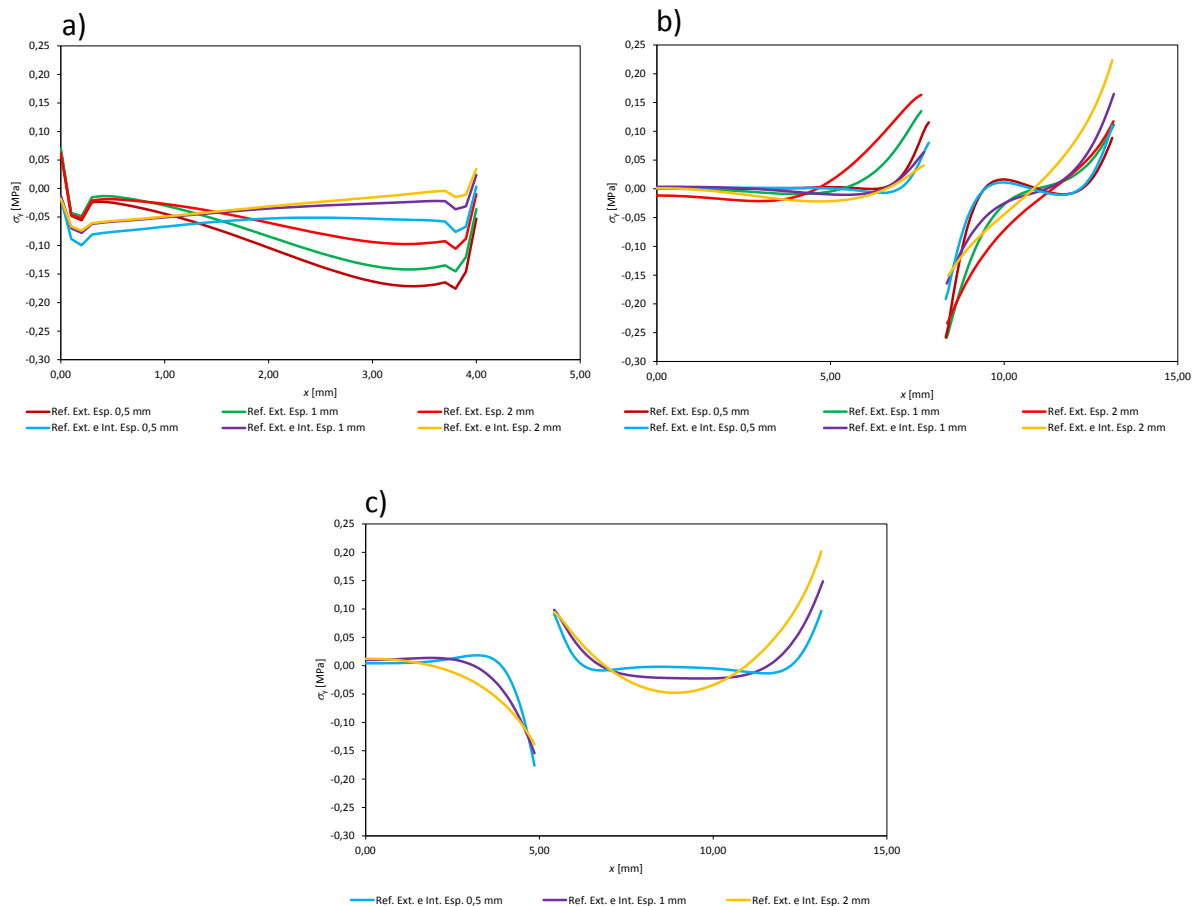


Figura 119 – Tensão de arrancamento σ_y , com $\alpha=45^\circ$ para as diferentes configurações e variações de espessura dos reforços, da camada de adesivo do remendo (a), do reforço exterior (b) e do reforço interior (c).

Pela Figura 119 – (a), (b) e (c) observam-se as mesmas distribuições de tensões observadas e descritas anteriormente no subcapítulo 4.3.1, no entanto deve-se referir que na Figura 119 – (a), para reparações em que se utiliza apenas reforço exterior, na extremidade livre da camada de adesivo do remendo, não se observa alteração dos valores da tensão de arrancamento com o aumento da espessura dos reforços, enquanto para a mesma a porção da camada de adesivo do remendo para extremidade próximo do reforço exterior, à medida que a espessura dos reforços aumenta o valor da tensão σ_y diminui. Ainda pela mesma

Figura 119 – (a) e para configurações de reparação em que se utiliza reforço exterior e interior, observa-se que ao longo de toda a camada de adesivo do remendo os valores da tensão de arrancamento diminuem ligeiramente com o aumento da espessura dos reforços. Para configurações de reparação em que apenas se utiliza reforços exteriores, pela Figura 119 – (b) observa-se que com o aumento da espessura do reforço aumenta o pico da tensão de arrancamento na extremidade da camada de adesivo do remendo exterior imediatamente antes da descontinuidade. Ainda pela Figura 119 – (b), observa-se que à medida que a espessura do reforço aumenta a distribuição de tensões fica mais uniforme e isto observa-se na porção da camada de adesivo do reforço exterior após a zona de descontinuidade, tanto para configurações em que apenas se utiliza reforço exterior como em configurações em que se utilizam ambos os reforços. Também se observa pela Figura 119 – (b) na porção da camada de adesivo do reforço exterior a seguir à descontinuidade que existe um aumento do pico da tensão σ_y com o aumento da espessura do reforço para configurações de reparação em que se utiliza ambos os reforços. Pela Figura 119 – (c) observa-se que com o aumento da espessura do reforço reduz-se ligeiramente o pico da tensão de arrancamento na extremidade da porção da camada de adesivo do reforço interior imediatamente antes da descontinuidade, e para a extremidade livre da porção da camada de adesivo do reforço interior a seguir à descontinuidade, observa-se que com o aumento da espessura do reforço aumenta-se o pico de tensão σ_y nessa zona. Como descrito anteriormente, com o aumento da espessura dos reforços também se aumentam os picos de tensão σ_y , tanto para extremidade livre da camada de adesivo do reforço exterior como interior, algo que potenciará a rotura prematura da reparação.

2. Tensões de Corte

Em primeiro lugar apresentam-se as distribuições das tensões τ_{xy} , para reparações com o adesivo Araldite® 2015 e $\alpha=10^\circ$ e em segundo lugar para reparações com $\alpha=45^\circ$. Na Figura 120 vão ser apresentadas as distribuições de tensões de corte para reparações com $\alpha=10^\circ$ e com a variação da espessura dos reforços, para a camada de adesivo do remendo (a), para a camada de adesivo do reforço exterior (b) e para a camada de adesivo do remendo interior (c). Para uma melhor interpretação das camadas de adesivo em análise ver Figura 69, Figura 74 e Figura 81, respetivamente.

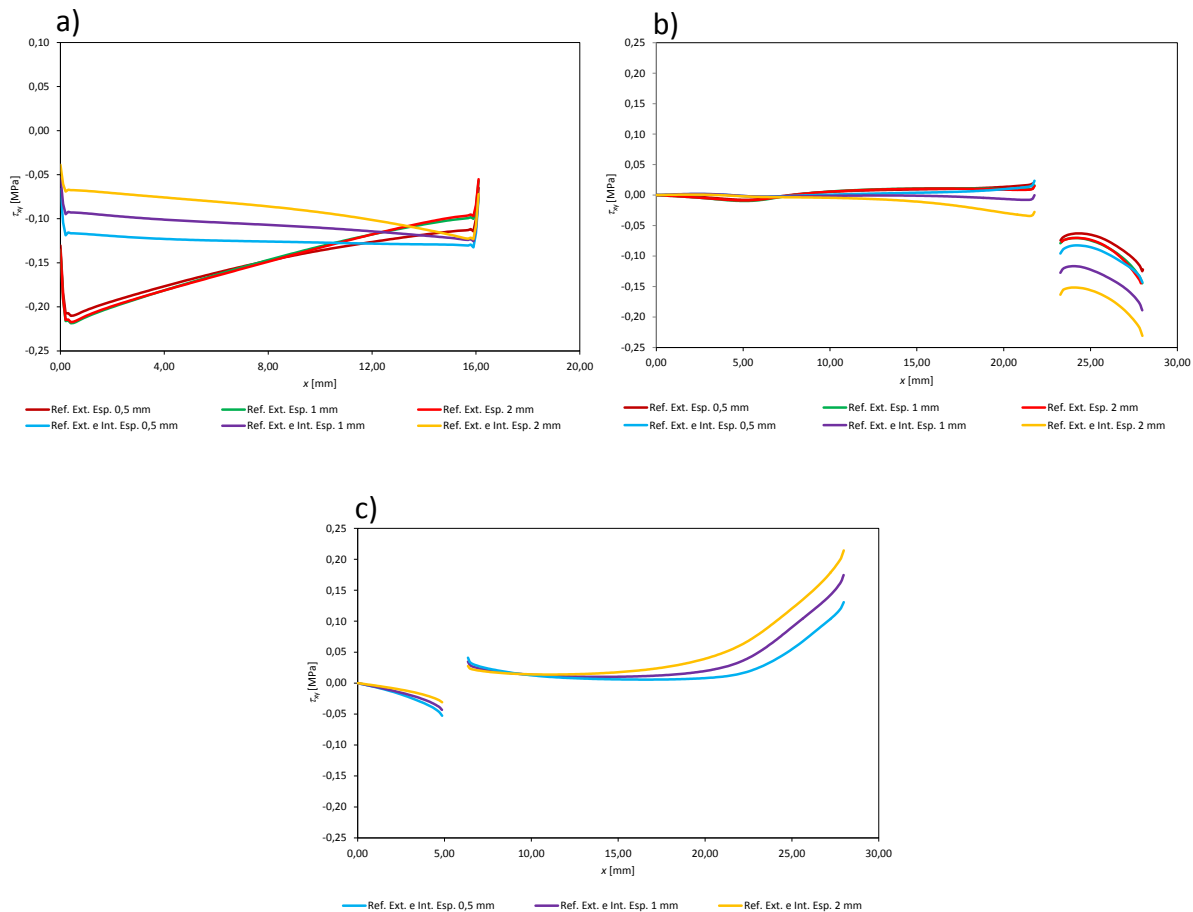


Figura 120 – Tensão de corte τ_{xy} , com $\alpha=10^\circ$ para as diferentes configurações e variações da espessura dos reforços, da camada de adesivo do remendo (a), do reforço exterior (b) e do reforço interior (c).

Na Figura 120 – (a), (b) e (c) observam-se as mesmas distribuições de tensões observadas e descritas anteriormente no subcapítulo 4.3.2, no entanto deve-se referir que na Figura 120 – (a) e para configurações em que se utiliza apenas reforço exterior, observa-se que na extremidade da camada de adesivo do remendo mais afastada do eixo de simetria, com o aumento da espessura diminui-se os valores da tensão de corte. Ainda pela Figura 120 – (a) observa-se que, para configurações de reparação em que se utiliza ambos os reforços à medida que se aumenta a espessura do reforço diminuem os valores da distribuição da tensão de corte para camada de adesivo do remendo. Na Figura 120 – (b) e para a porção da camada de adesivo do reforço exterior antes da descontinuidade não se observa grande alteração da distribuição da tensão com a variação da espessura do reforço, mas para a porção da camada de adesivo a seguir à descontinuidade observa-se que aumentam os valores da distribuição de tensão e de pico de tensão da extremidade livre dessa porção da camada de adesivo, com o aumento da espessura do reforço. Pela Figura 120 – (c) e para a

porção da camada de adesivo do reforço interior antes da descontinuidade, não se observa alteração dos valores da tensão de corte com o aumento da espessura do reforço, mas para a porção da camada de adesivo do reforço interior a seguir à descontinuidade, observa-se que à medida que a espessura do reforço aumenta também vão aumentando os valores da distribuição da tensão de corte, e também aumenta o valor dos picos de tensão na extremidade livre dessa camada de adesivo. Como os picos de tensão na extremidade livre da camada de adesivo de ambos reforços aumentam com a espessura do reforço, estes aumentos de tensão potenciarão a rotura prematura das reparações.

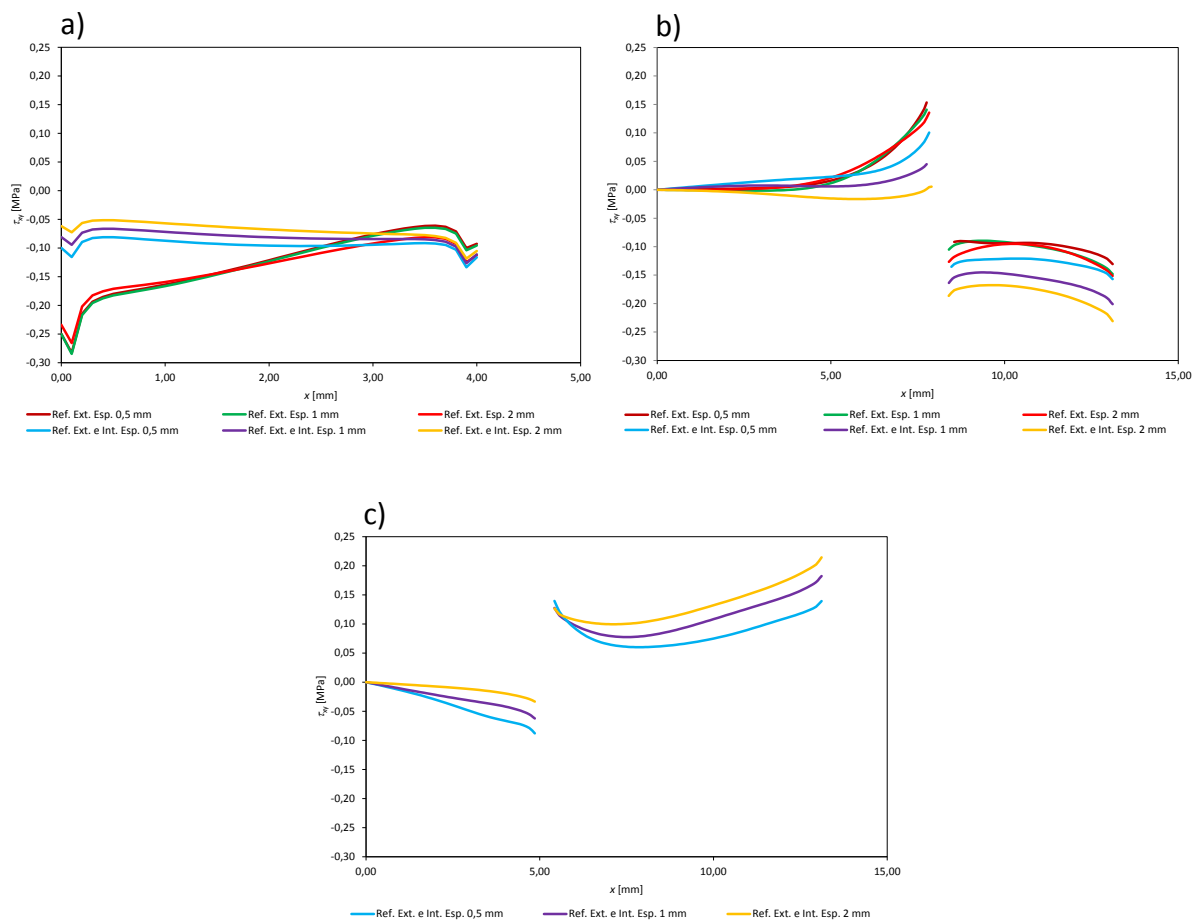


Figura 121 – Tensão de corte τ_{xy} , com $\alpha=45^\circ$ para as diferentes configurações e variações da espessura dos reforços, da camada de adesivo do remendo (a), do reforço exterior 8b) e do reforço interior (c).

Apresentam-se, para as reparações com $\alpha=45^\circ$ e com a variação da espessura dos reforços, as distribuições de tensões τ_{xy} para a camada de adesivo do remendo, Figura 121 – (a), para a camada de adesivo do reforço exterior, Figura 121 – (b) e para a camada de adesivo do remendo interior, Figura 121 – (c). Para uma melhor interpretação das camadas de adesivo

em análise ver Figura 69, Figura 74 e Figura 81. Observam-se na Figura 120 – (a), (b) e (c) as mesmas distribuições de tensão τ_{xy} que foram observadas e descritas no subcapítulo 4.3.2. Pela Figura 121 – (a) observa-se praticamente o mesmo que já foi descrito para a Figura 120 – (a). Na Figura 121 – (b) e para configurações de reparação em que se utilizam apenas reforço exterior, observa-se que com o aumento da espessura do reforço não existe variação da distribuição de tensão ao longo da camada de adesivo, mas para configurações de reparação em que se utilizam ambos os reforços, observa-se que com o aumento da espessura dos reforços os valores da distribuição da tensão de corte diminuem para a porção da camada de adesivo do reforço exterior antes da descontinuidade, e depois da descontinuidade observa-se que à medida que a espessura dos reforços vai aumentando também se aumentam os valores da tensão. Pela Figura 121 – (c) observa-se exatamente o mesmo que já foi descrito para a Figura 121 – (b) nas reparações em que se utilizam ambos os reforços. Com estes aumentos de tensão provavelmente potencia-se a rotura prematura das reparações.

3. Curvas $P-\delta$ e resistência das reparações

Em primeiro lugar apresentam-se as curvas $P-\delta$ e a resistência das reparações com adesivo Araldite® 2015, e em seguida as reparações com o adesivo Araldite® AV138. Para facilitar a interpretação das figuras apresentadas optou-se por fazer uma divisão dos gráficos por configuração de reparação, em que se utilizou apenas reforço exterior ou reforço exterior e interior.

- Adesivo Araldite® 2015

Apresentam-se as curvas $P-\delta$ para reparações com o adesivo Araldite® 2015 e com $\alpha=10^\circ$, para configurações de reparação em que se utiliza apenas reforço exterior, Figura 122 – (a), e configurações de reparação em que se utilizam ambos os reforços, Figura 122 – (b).

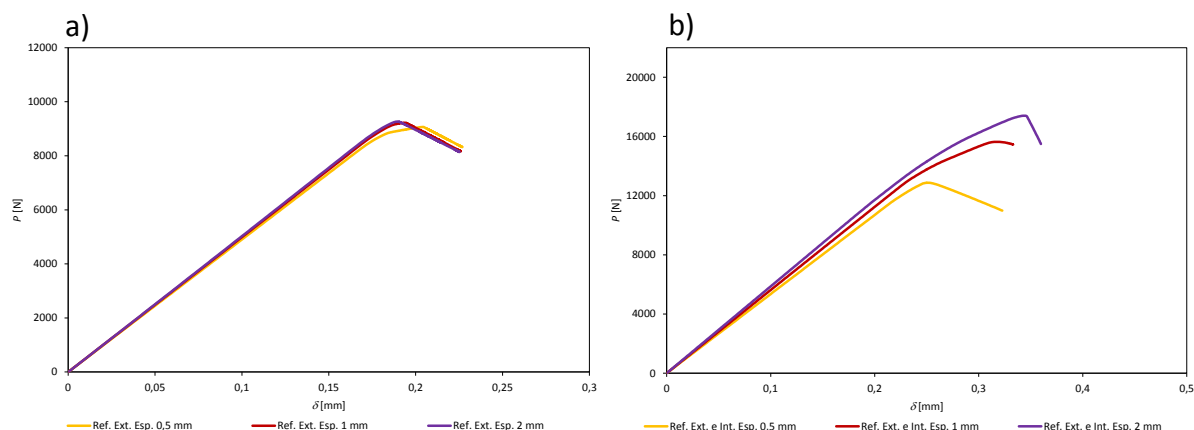


Figura 122 – Curvas $P-\delta$ numéricas com variação de espessura dos reforços para $\alpha=10^\circ$ e adesivo Araldite® 2015 apenas com reforço exterior (a) e com reforço exterior e interior (b).

Pela Figura 122 – (a) observa-se no regime elástico um ligeiro aumento da rigidez com o aumento da espessura dos reforços e no regime plástico observa-se que com o aumento da espessura dos reforços a ductilidade da reparação diminui ligeiramente. Para a Figura 122 – (b) observa-se o mesmo que foi descrito para a Figura 122 – (a) mas com aumentos de rigidez e reduções de ductilidade das reparações mais acentuadas. Em termos de $P_{\text{máx}}$, pela Figura 122 – (a) não se observa grande alteração com o aumento da espessura do reforço, enquanto para a Figura 122 – (b) se observa que com o aumento da espessura dos reforços também se aumenta $P_{\text{máx}}$. Para a configuração em que se utilizam ambos os reforços, observa-se um aumento de $P_{\text{máx}}$ com o aumento da espessura dos reforços, pois os valores de σ_y aumentam ligeiramente e os valores de τ_{xy} diminuem, e quem dita a resistência da reparação são as tensões τ_{xy} e não as σ_y [44]. Na Figura 123 – (a) apresentam-se as curvas $P-\delta$ para reparações com o adesivo Araldite® 2015, com $\alpha=45^\circ$ e para configurações de reparação em que se utiliza reforço exterior e na Figura 123 – (b) apresentam-se as curvas $P-\delta$ para reparações com o adesivo Araldite® 2015, com $\alpha=45^\circ$ e para configurações de reparação em que se utiliza tanto reforço exterior como interior. Na Figura 123 – (a) e (b) observa-se praticamente o mesmo que já foi para a Figura 122 (a) e (b). No entanto deve-se referir que as diferenças de rigidez, ductilidade e valores obtidos para $P_{\text{máx}}$ observados pela Figura 123 – (a) e (b) são menos significativas do que as diferenças observadas na Figura 122 – (a) e (b).

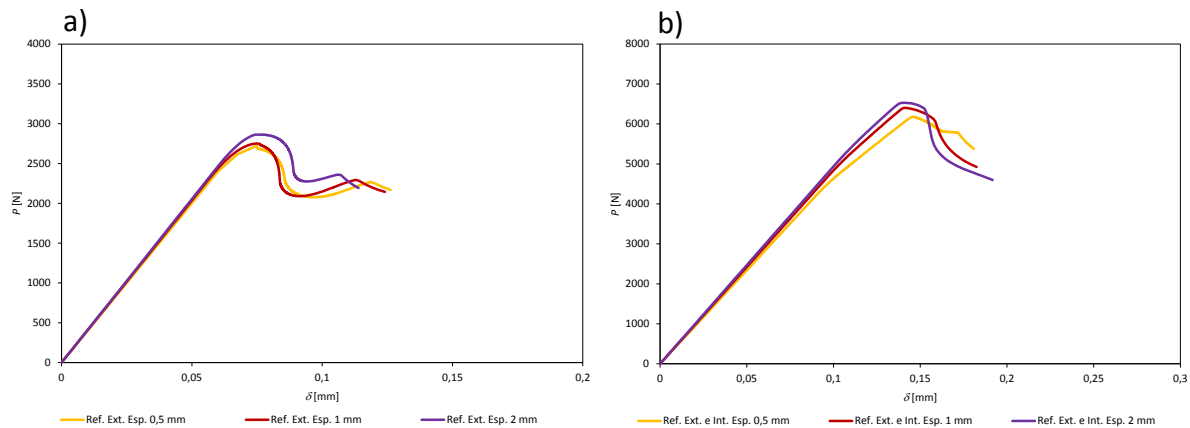


Figura 123 – Curvas P – δ numéricas com variação de espessura dos reforços para $\alpha=45^\circ$ e adesivo Araldite® 2015 apenas com reforço exterior (a) e com reforço exterior e interior (b).

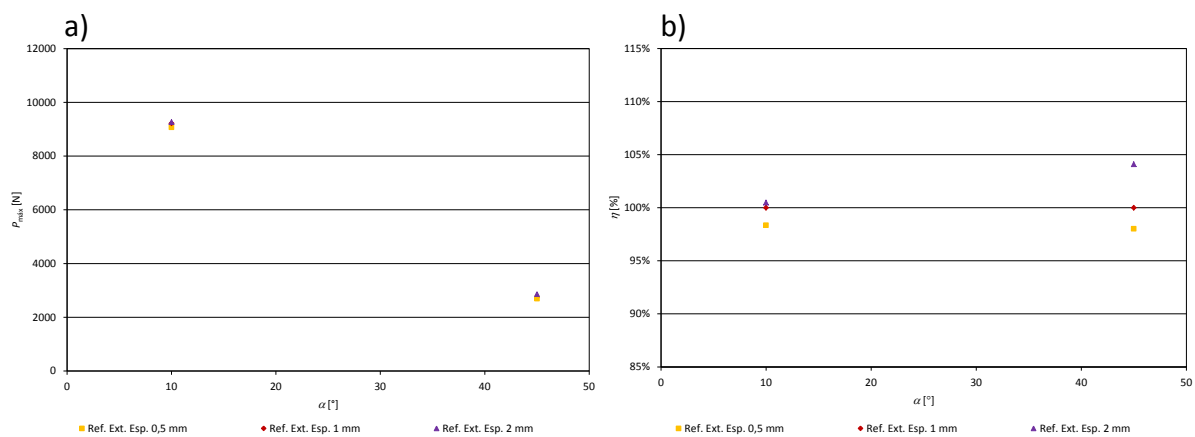


Figura 124 – Comparação de $P_{\text{máx}}$ (a) e de η (b) para o adesivo Araldite® 2015, apenas com reforço exterior e variação da espessura dos reforços.

Na Figura 124 – a) apresenta-se a comparação de $P_{\text{máx}}$ em função de α com o aumento da espessura dos reforços, para reparações com o adesivo Araldite® 2015 e com a utilização de reforços exteriores, e na Figura 124 – (b) apresenta-se a comparação de η em função de α com o aumento da espessura dos reforços, para as mesmas configurações de reparação. Pela Figura 124 – (a) observa-se que não existe praticamente nenhuma alteração de $P_{\text{máx}}$ da reparação, tanto para valores de $\alpha=10^\circ$ e 45° com o aumento da espessura do reforço para configurações de reparação em que se utiliza apenas reforço exterior. Pela Figura 124 – (b) observa-se que para configurações de reparação em que apenas se utiliza reforço exterior e para $\alpha=10^\circ$, existe variação de cerca de 1 % a 2 % dos valores de $P_{\text{máx}}$ da reparação para as diferentes espessuras de reforço em análise, relativamente a uma espessura de reforço igual

a 1 mm, e para a mesma configuração de reparação observa-se que para $\alpha=45^\circ$, existe variação de cerca de 3 % a 4 % de $P_{\text{máx}}$ da reparação para as diferentes espessuras de reforço em análise, quando comparado com uma espessura de reforço igual a 1 mm. Como explicado anteriormente e pela análise das distribuições das tensões com o aumento da espessura do reforço reduzem-se os valores da distribuição da tensão τ_{xy} e são estas as tensões que mais influenciam a rotura da reparação [44]. A seguir apresenta-se a comparação de $P_{\text{máx}}$ em função de α com o aumento da espessura dos reforços, para reparações com o adesivo Araldite® 2015 e com a utilização de reforços exteriores Figura 125 – (a), e também se apresenta a comparação de η em função de α com o aumento da espessura dos reforços, para reparações com o adesivo Araldite® 2015 e com a utilização de reforços exteriores Figura 125 – (b).

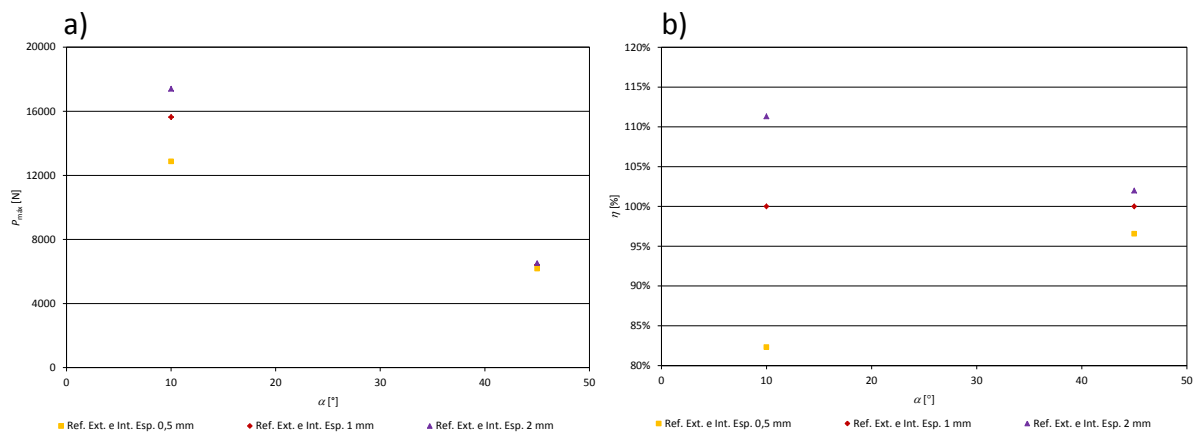


Figura 125 – Comparação de $P_{\text{máx}}$ (a) e de η (b) para o adesivo Araldite® 2015, com reforço exterior e interior e variação da espessura dos reforços.

Na Figura 125 – (a) observa-se que existe aumento de $P_{\text{máx}}$ para reparações com $\alpha=10^\circ$ com o aumento da espessura do reforço e com a utilização de reforço exterior e interior, para reparações com $\alpha=45^\circ$ e com a mesma configuração de reforço não se observa variação dos valores de $P_{\text{máx}}$ da reparação com o aumento da espessura dos reforços. Na Figura 125 – (b) observa-se que existe variação de cerca de 15 % a 16 % dos valores de $P_{\text{máx}}$ com o aumento da espessura do reforço, para reparações com $\alpha=10^\circ$ e com a utilização de reforço exterior e interior, quando comparado com uma espessura de reforço igual a 1 mm, também se observa Figura 125 – (b) que para reparações com $\alpha=45^\circ$ e com a mesma configuração de reforço, existe variação dos valores de $P_{\text{máx}}$ da reparação na ordem dos 3 % a 4 % com o

aumento da espessura do reforço e quando comparado com uma espessura de reforço igual a 1 mm. Estas variações dos valores de $P_{\text{máx}}$ ocorrem pelos mesmos motivos foram enunciadas para o caso anterior.

- Adesivo Araldite® AV138

Na Figura 126 apresentam-se as curvas $P-\delta$ para reparações com o adesivo Araldite® AV138, com $\alpha=10^\circ$ para configurações de reparação em que se utiliza apenas reforço exterior (a) e configurações de reparação em que se utilizam reforço exterior e interior (b).

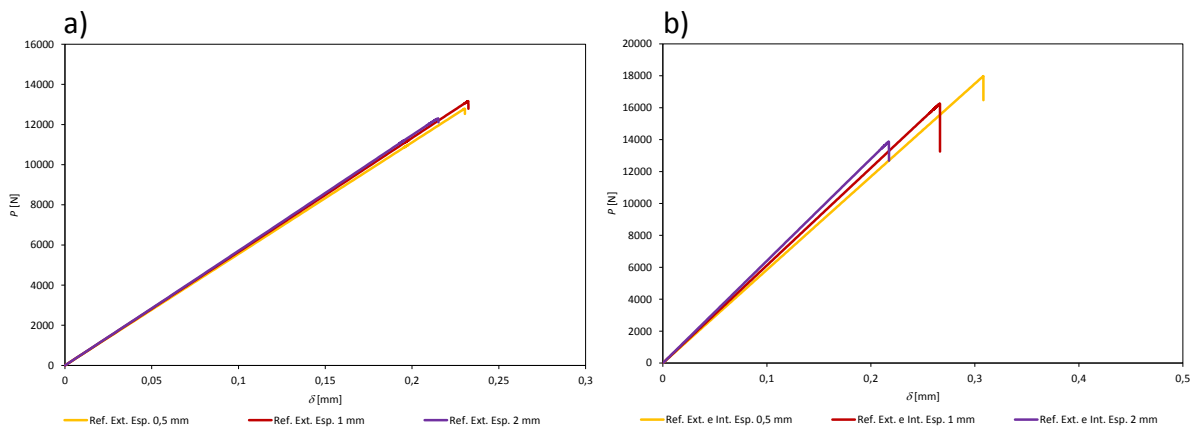


Figura 126 – Curvas $P-\delta$ numéricas com variação de espessura dos reforços para $\alpha=10^\circ$ e adesivo Araldite® AV138 apenas com reforço exterior (a), e com reforço exterior e interior (b).

Pela Figura 126 – (a) e (b) observa-se que com o aumento da espessura dos reforços aumenta-se a rigidez da reparação e que após ser atingido $P_{\text{máx}}$ observa-se no regime plástico uma queda repentina da carga, que corresponde a uma rotura catastrófica da resistência reparação, característica típica dos materiais com comportamento frágil [115]. Na Figura 126 – (a) observa-se que com o aumento da espessura do reforço de 0,5 mm para 1 mm existe uma ligeira redução de $P_{\text{máx}}$ e quando se aumenta a espessura do reforço de 1 mm para 2 mm observa-se também que existe uma maior redução do valor de $P_{\text{máx}}$. Pela Figura 126 – (b) observa-se que à medida que se aumenta a espessura do reforço a resistência da reparação diminui. Este comportamento deve-se ao facto de o adesivo Araldite® AV138 possuir um comportamento frágil e da rigidez da reparação aumentar com o aumento da espessura do reforço o que origina uma menor tolerância da reparação à deformação quando solicitada por tração. Apresentam-se na Figura 127 – (a) as curvas $P-\delta$ para reparações com o adesivo Araldite® AV138, com $\alpha=45^\circ$ e para configurações de

reparação em que se utiliza reforço exterior e na Figura 127 – (b) são apresentadas as curvas $P-\delta$ para reparações com o adesivo Araldite® AV138, com $\alpha=45^\circ$ e para configurações de reparação em que se utiliza reforço exterior e interior.

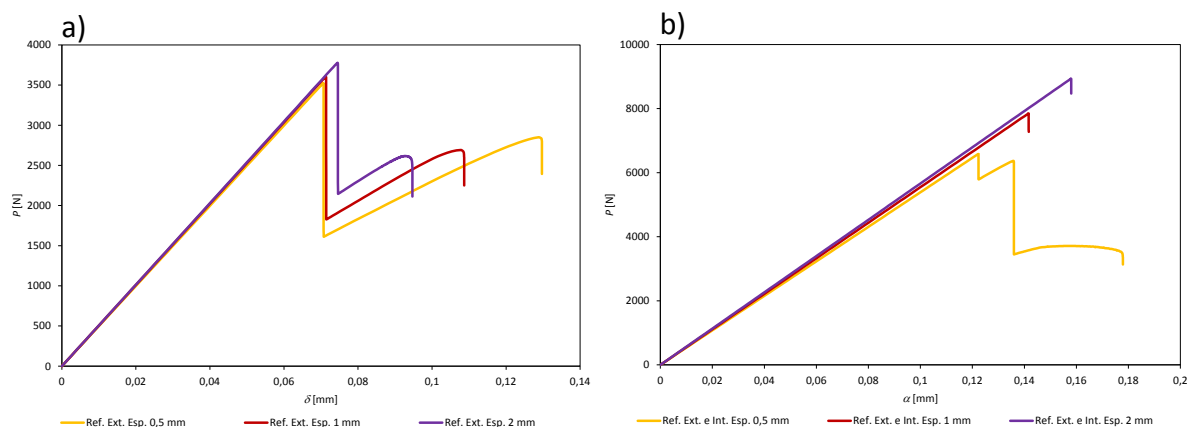


Figura 127 – Curvas $P-\delta$ numéricas com variação de espessura dos reforços para $\alpha=45^\circ$ e adesivo Araldite® AV138 apenas com reforço exterior (a) e com reforço exterior e interior (b).

Pela Figura 127 – (a) e (b) verifica-se para reparações para $\alpha=45^\circ$ com o aumento da espessura dos reforços praticamente não modifica a rigidez da reparação, quer se utilize apenas reforço exterior ou ambos os reforços. Também no regime plástico observa-se que com o aumento da espessura do reforço, a deformação da reparação diminui e que existe uma queda repentina da carga, que corresponde a uma rotura catastrófica, característica típica de materiais com comportamento frágil [115]. Pela Figura 127 – (a) com o aumento da espessura do reforço observa-se que $P_{\text{máx}}$ aumenta ligeiramente. Pela Figura 127 – b) observa-se que à medida que se aumenta a espessura do reforço o valor de $P_{\text{máx}}$ da reparação aumenta. Ao contrário do que se observou para reparações com $\alpha=10^\circ$ (ver Figura 126 – (a) e (b)), este comportamento ocorre pois para $\alpha=45^\circ$ não se observa grande alteração da rigidez da reparação com o aumento da espessura do reforço, comparativamente a reparações com $\alpha=10^\circ$ e também porque a deformação da reparação com $\alpha=45^\circ$ no instante em que se atinge o valor máximo da resistência é relativamente inferior do que para reparações com $\alpha=10^\circ$.

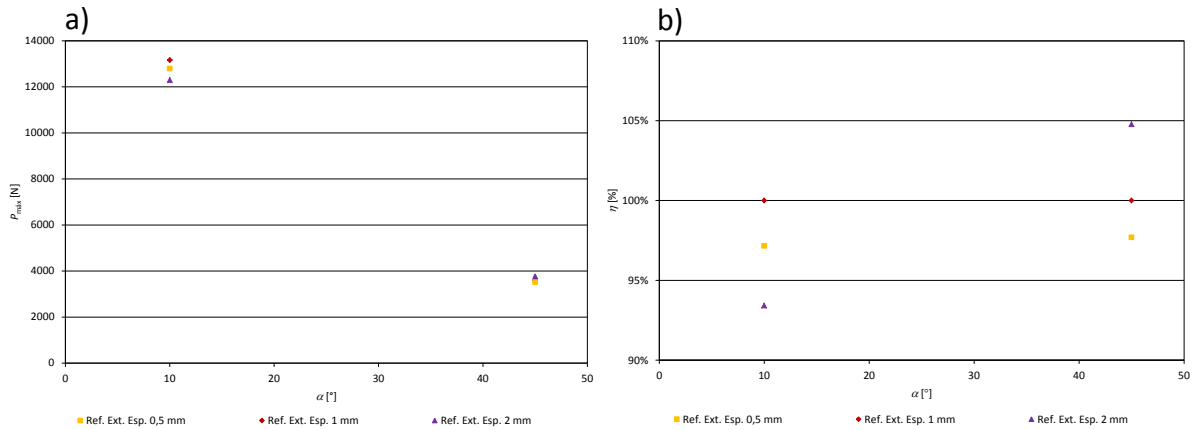


Figura 128 – Comparação de $P_{máx}$ (a), e de η (b), para o adesivo Araldite® AV138, apenas com reforço exterior e variação de espessura dos reforços.

Na Figura 128 são apresentadas as comparações de $P_{máx}$ em função de α com o aumento da espessura dos reforços, para reparações com o adesivo Araldite® AV138 e com a utilização de reforços exteriores (a), e de η em função de α com o aumento da espessura dos reforços, para as mesmas configurações de reparação (b). Pela Figura 128 – (a) observa-se que para $\alpha=10^\circ$ existe uma ligeira variação dos valores de $P_{máx}$ e que para $\alpha=45^\circ$ não existe praticamente nenhuma alteração de $P_{máx}$ para as reparações em que se utiliza apenas reforço exterior. Pela Figura 128 – (b) observa-se que para $\alpha=10^\circ$ existe redução de cerca de 4 % a 7 % de $P_{máx}$ quando se varia a espessura do reforço para valores diferentes de 1mm, e para um $\alpha=45^\circ$ existe variação de cerca de 3 % a 5 % de $P_{máx}$ com o aumento da espessura dos reforços.

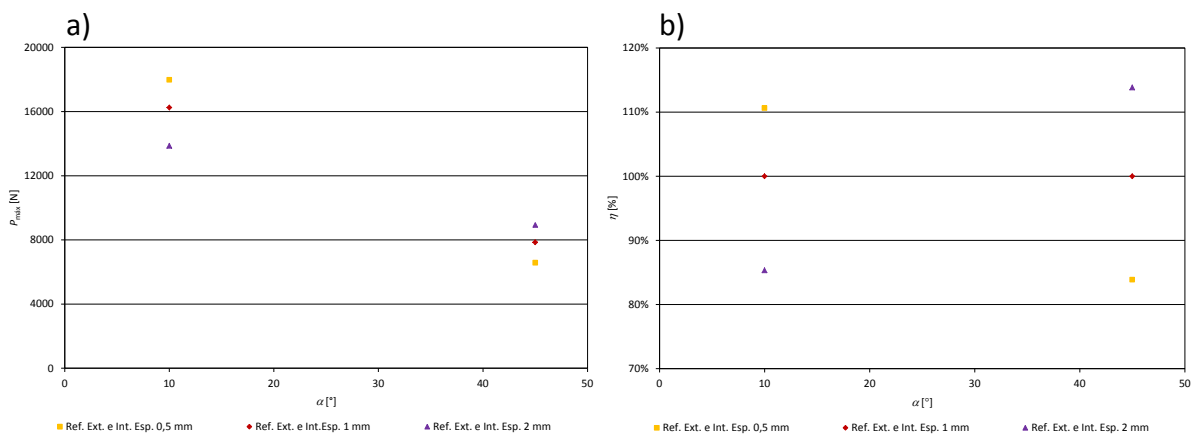


Figura 129 – Comparação de $P_{máx}$ (a), e de η (b), para o adesivo Araldite® AV138, com reforço exterior e interior e variação de espessura dos reforços.

Apresenta-se a comparação de $P_{\text{máx}}$ em função de α com o aumento da espessura dos reforços, para reparações com o adesivo Araldite® AV138 e com a utilização de reforços exteriores, Figura 129 – (a), e também se apresenta a comparação de η em função de α com o aumento da espessura dos reforços, para reparações com o adesivo Araldite® AV138 e com a utilização de reforços exteriores, Figura 129 – (b). Pela Figura 129 – (a) observa-se que para $\alpha=10^\circ$ existe um aumento dos valores de $P_{\text{máx}}$, com a diminuição da espessura do reforço, e que para $\alpha=45^\circ$ existe um aumento dos valores de $P_{\text{máx}}$ com o aumento da espessura do reforço. Pela Figura 129 – (b) observa-se que para $\alpha=10^\circ$ existe variação de cerca de 10 % a 13 % de $P_{\text{máx}}$ quando se varia a espessura do reforço e que à medida que se reduz a espessura dos reforços aumentam-se os valores de $P_{\text{máx}}$, e para $\alpha=45^\circ$ existe uma variação de cerca de 12 % a 15 % de $P_{\text{máx}}$ com o aumento da espessura dos reforços e que à medida que se aumenta a espessura dos reforços aumenta-se também $P_{\text{máx}}$.

4.6.2. Chanfro nas extremidades dos reforços

Neste estudo em primeiro lugar apresentam-se as análises das distribuições das tensões de arrancamento e de corte e em seguida apresentam-se as curvas $P-\delta$ e a resistência das reparações para os adesivos Araldite® 2015 e Araldite® AV138.

1. Tensões de arrancamento

Em primeiro lugar são apresentadas as tensões σ_y para as reparações com o adesivo Araldite® 2015 e $\alpha=10^\circ$ e em segundo lugar para reparações com $\alpha=45^\circ$. Na Figura 130 – (a) apresentam-se as distribuições das tensões σ_y para a camada de adesivo da reparação, na Figura 130 – (b) apresentam-se a distribuições das tensões σ_y para a camada de adesivo do reforço exterior e na Figura 130 – (c) apresentam-se as distribuições das tensões σ_y para a camada de adesivo do reforço interior, com $\alpha=10^\circ$ e com a execução de um chanfro nas extremidades dos reforços. Estes chanfros foram realizados nas extremidades dos reforços para se minimizar a perturbação aerodinâmica causada pelos mesmos. Para melhor identificação das camadas de adesivo em análise ver Figura 69, Figura 74 e Figura 81.

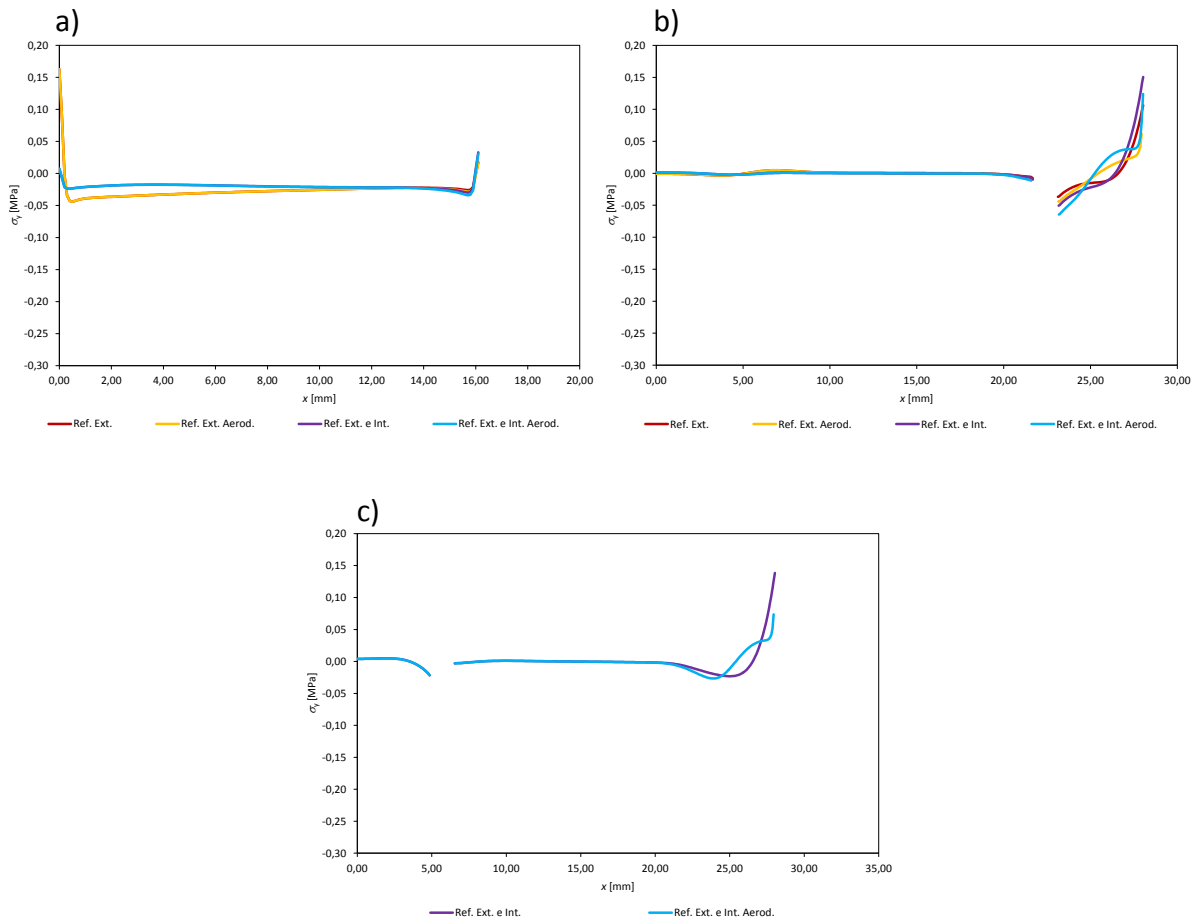


Figura 130 – Tensão de arrancamento σ_y , com $\alpha=10^\circ$ para as diferentes configurações e um chanfro nas extremidades dos reforços, da camada de adesivo do remendo (a), do reforço exterior (b) e do reforço interior (c).

Pela Figura 130 – (a) observam-se distribuições de tensões σ_y ao longo da camada de adesivo do remendo que já foram enunciadas em análises anteriores. Pela Figura 130 –(b) e (c) para as porções das camadas de adesivo dos reforços antes da descontinuidade não se verifica variação dos valores de σ_y para reparações com $\alpha=10^\circ$ e para todas as configurações de reforços, mas a seguir à descontinuidade observa-se uma diminuição dos valores σ_y com a execução do chanfro, principalmente perto da extremidade do reforço comparativamente com a configuração dos reforços em que não se executaram os chanfros. Com esta diminuição dos valores do pico de tensão promover-se-á um aumento da resistência da reparação. Apresenta-se na Figura 119 as distribuições de tensões σ_y com $\alpha=45^\circ$ para a camada de adesivo do remendo (a), para a camada de adesivo do reforço exterior (b) e para a camada de adesivo do remendo interior (c). Para uma melhor interpretação das camadas de adesivo em análise ver Figura 69, Figura 74 e Figura 81. Pela Figura 131 – (a), (b) e (c) não

se observa variação das distribuições de σ_y em relação ao que foi descrito para a Figura 130 – (a), (b) e (c).

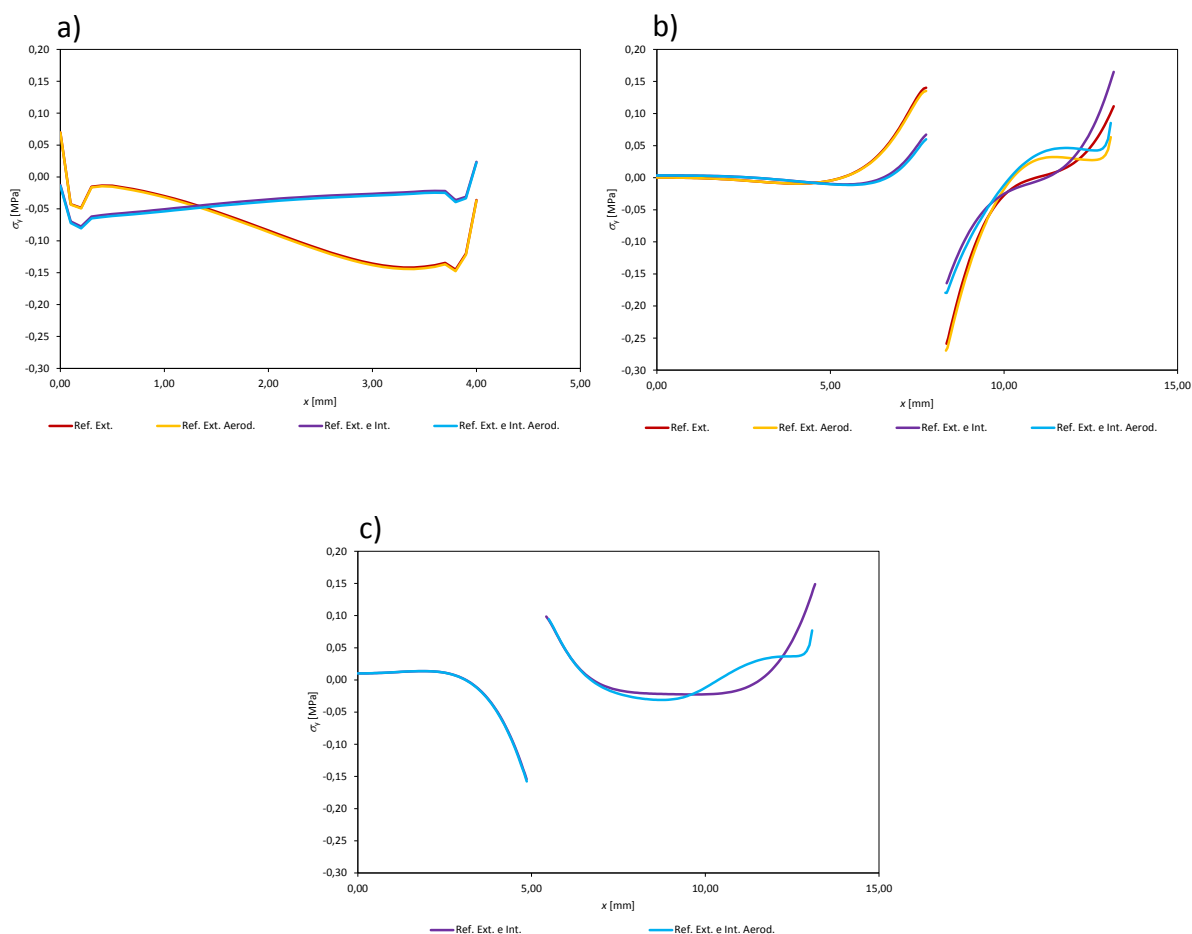


Figura 131 – Tensão de arrancamento σ_y , com $\alpha=45^\circ$ para as diferentes configurações e um chanfro na extremidade dos reforços, da camada de adesivo do remendo (a), do reforço exterior (b) e do reforço interior (c).

2. Tensões de Corte

Apresentam-se em primeiro lugar os gráficos com os valores da tensão τ_{xy} , para reparações com o adesivo Araldite® 2015 e $\alpha=10^\circ$ e em segundo lugar para reparações com $\alpha=45^\circ$. Na Figura 132 são apresentadas as distribuições de τ_{xy} para reparações com $\alpha=10^\circ$ e com a execução de um chanfro nas extremidades dos reforços para a camada de adesivo do remendo (a), para a camada de adesivo do reforço exterior (b) e para a camada de adesivo do remendo interior (c). Para uma melhor interpretação das camadas de adesivo em análise ver Figura 69, Figura 74 e Figura 81.

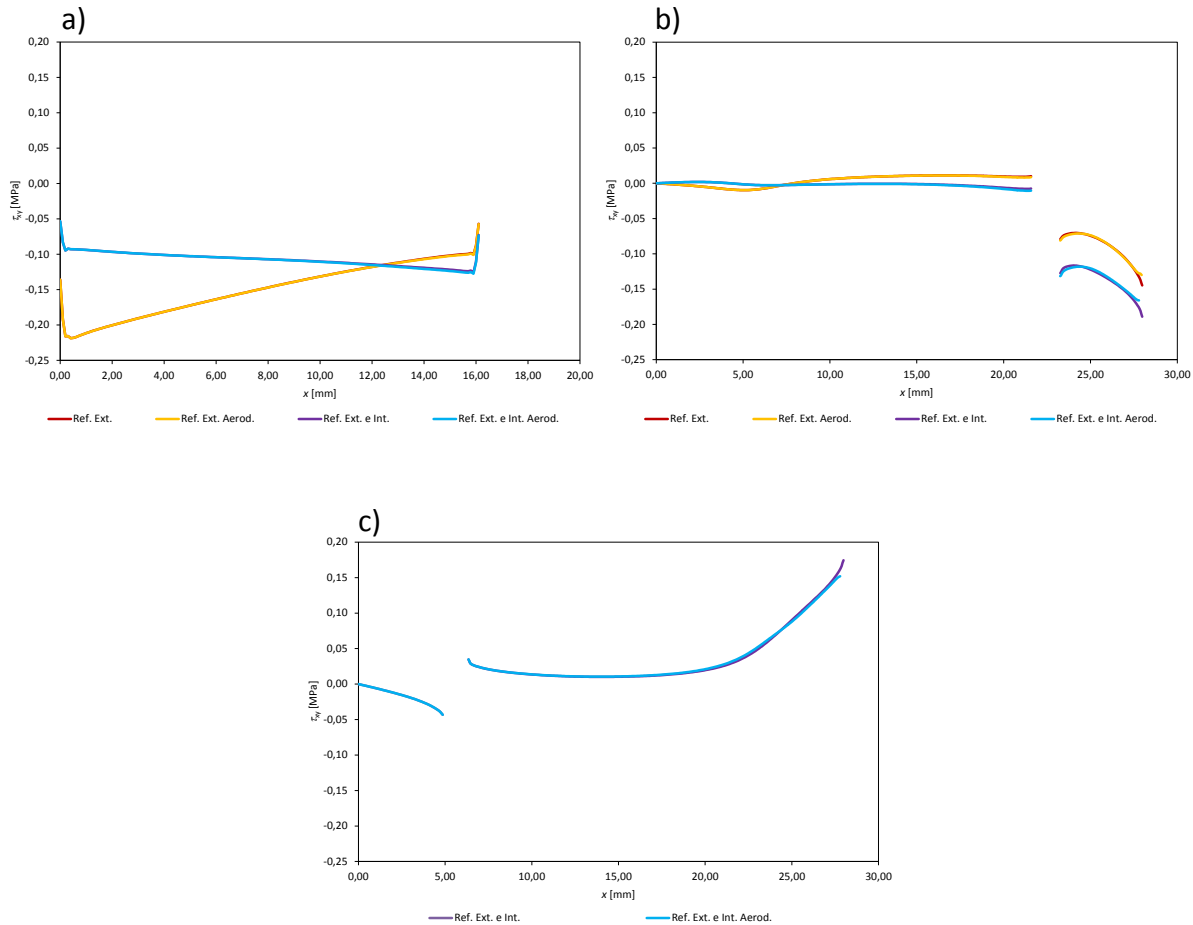


Figura 132 – Tensão de corte τ_{xy} , com $\alpha=10^\circ$ para as diferentes configurações e um chanfro na extremidade dos reforços, da camada de adesivo do remendo (a), do reforço exterior (b) e do reforço interior (c).

Observam-se na Figura 132 (a) distribuições de τ_{xy} ao longo da camada de adesivo do remendo idênticas ao que foram enunciadas em análises anteriores. Na Figura 132 (b) e (c) observa-se que para as porções das camadas de adesivo antes da descontinuidade, tanto dos reforços exteriores como interiores, não se verificam alterações dignas de registo das distribuições de τ_{xy} , mas para as porções das camadas de adesivo a seguir à descontinuidade observa-se nas extremidades livres, quer do reforço exterior como do reforço interior, uma ligeira diminuição do pico de τ_{xy} para os reforços nos quais se realizaram o chanfro nas extremidades comparativamente com os reforços em que não se realizaram esses chanfros. Como já referido anteriormente para a Figura 130 – (a), (a) e (c) com esta diminuição dos valores do pico de tensão promover-se-á um aumento da resistência da reparação. Apresentam-se para as configurações de reparação com $\alpha=45^\circ$ e para configurações de reforços em que se a executam chanfros nas extremidades, as distribuições de τ_{xy} para a

camada de adesivo do remendo Figura 133 – a), para a camada de adesivo do reforço exterior Figura 133 – b), e para a camada de adesivo do remendo interior Figura 133 – c). Para uma melhor interpretação das camadas de adesivo em análise ver Figura 69, Figura 74 e Figura 81.

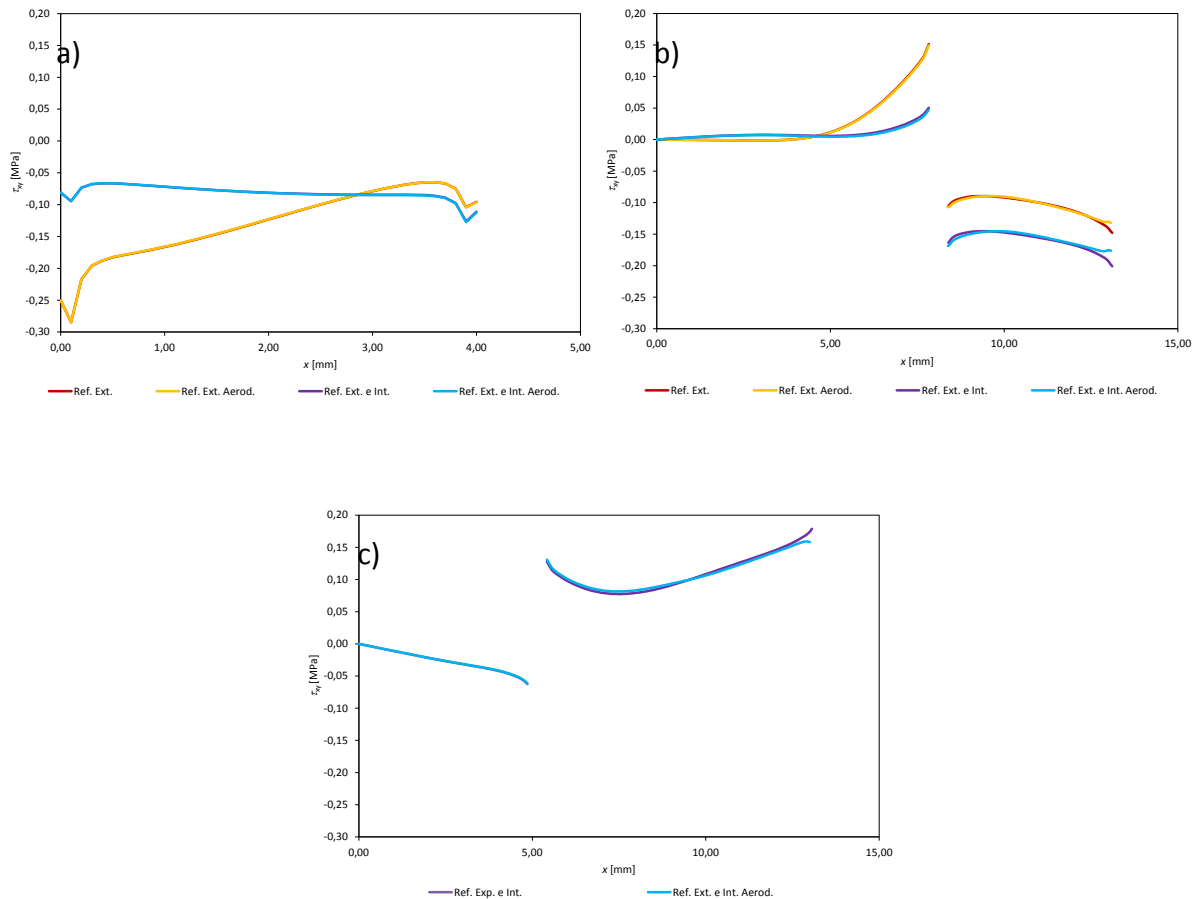


Figura 133 – Tensão de corte τ_{xy} , com $\alpha=45^\circ$ para as diferentes configurações e um chanfro na extremidade dos reforços, da camada de adesivo do remendo (a), do reforço exterior (b) e do reforço interior (c).

Para reparações com $\alpha=45^\circ$, pela Figura 133 – (a), (b) e (c) observam-se praticamente as mesmas distribuições de τ_{xy} que foram descritas para reparações com $\alpha=10^\circ$, (ver Figura 132 – (a), (b) e (c)).

3. Curvas P – δ e resistência das reparações

São apresentadas em primeiro lugar as curvas P – δ e a resistência das juntas para reparações com adesivo Araldite® 2015 e em que se executam chanfros nas extremidades dos reforços, e em seguida para reparações com o adesivo Araldite® AV138 com as mesmas configurações de reforços.

- Adesivo Araldite® 2015

Na Figura 134 apresentam-se as curvas P – δ para reparações com o adesivo Araldite® 2015 para reparações com $\alpha=10^\circ$ (a) e reparações com $\alpha=45^\circ$ (b), em que se executam chanfros nas extremidades dos reforços.

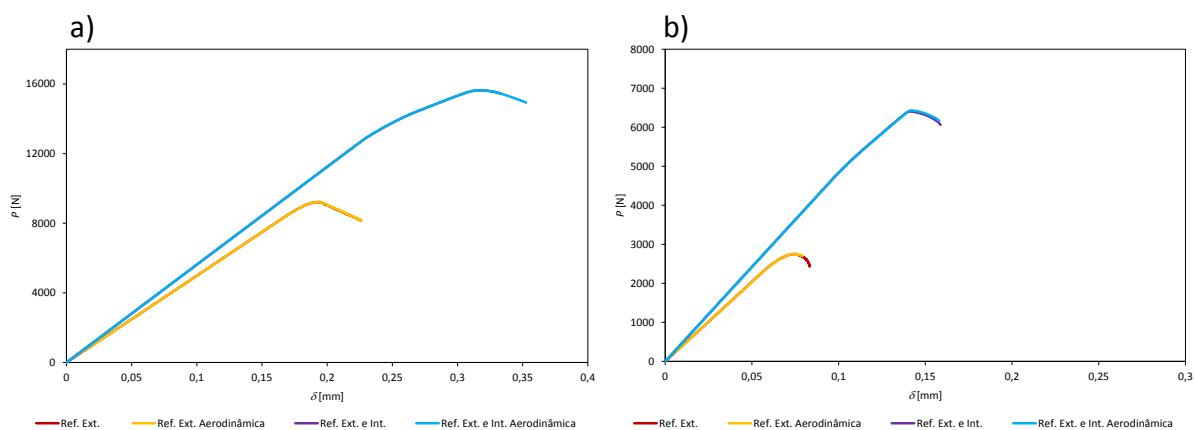


Figura 134 – Curvas P – δ numéricas para adesivo Araldite® 2015 com chanfro na extremidade com $\alpha=10^\circ$ (a) e com $\alpha=45^\circ$ (b).

Pela Figura 134 – (a) e (b), em termos de rigidez e de ductilidade da reparação não se observam alterações com a execução dos chanfros nas extremidades dos reforços quando comparado com os reforços em que não se executam os chanfros. Também se observa que não houve variação digna de registo da resistência da reparação com a execução do chanfro na extremidade dos reforços. O comportamento descrito para reparações está de acordo com análise das tensões realizada anteriormente. Na Figura 135 são apresentadas as comparações de $P_{\text{máx}}$ em função de α (a), com a execução dos chanfros nas extremidades dos reforços, para reparações com o adesivo Araldite® 2015 e de η em função de α (b) para as mesmas configurações de reparação.

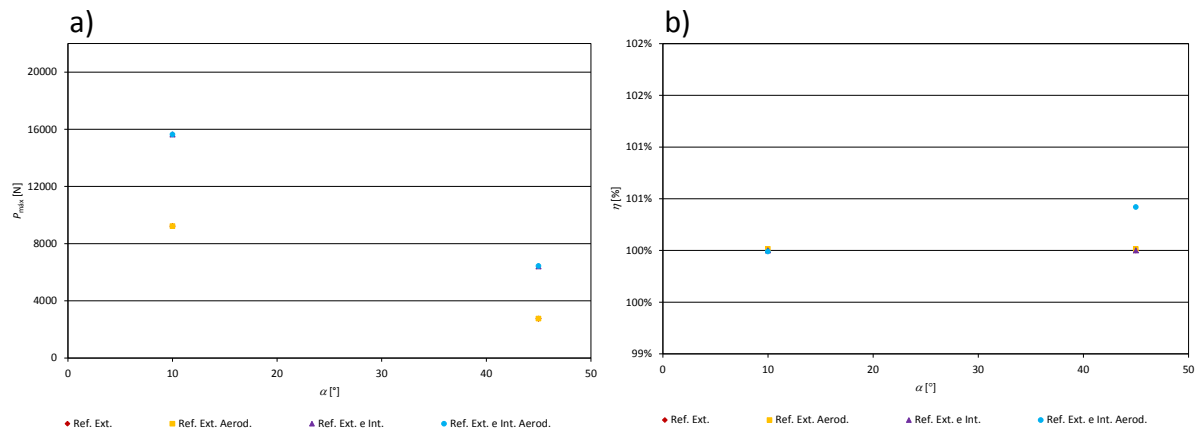


Figura 135 – Comparação de P_{\max} (a) e de η (b) para o adesivo Araldite® 2015 com um chanfro efetuado na extremidade do reforço.

Pela Figura 135 – (a) e (b) não se observa variação digna de registro da resistência da reparação em que se executam os chanfros nas extremidades dos reforços comparativamente com as configurações dos reforços em que não se executam os chanfros. Sempre que se deva considerar, para efeitos de dimensionamento da reparação o efeito da perturbação aerodinâmica causada pela utilização de reforços, esta técnica deve ser utilizada, pois não provoca variação da resistência da reparação digna de registro.

- Adesivo Araldite® AV138

São apresentadas na Figura 136 (a) as curvas $P-\delta$ para reparações com $\alpha=10^\circ$ (a) e com $\alpha=45^\circ$ (b) para reparações com o adesivo Araldite® AV 138 e em que se executam chanfros nas extremidades dos reforços.

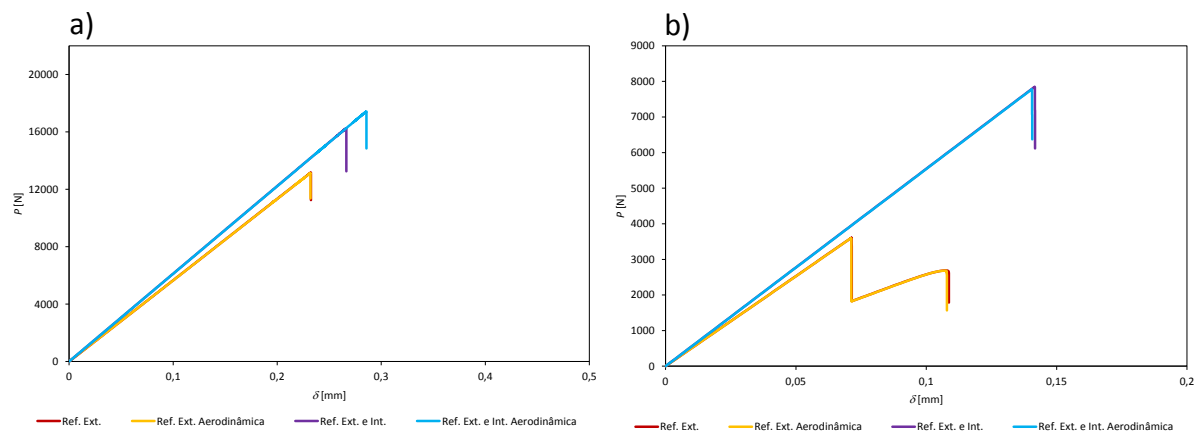


Figura 136 – Curvas $P-\delta$ numéricas para adesivo Araldite® AV138 com chanfro na extremidade com $\alpha=10^\circ$ (a) e com $\alpha=45^\circ$ (b).

Em termos de rigidez e de ductilidade da reparação, pela Figura 136 – (a) e (b) não se observam alterações de $P_{\text{máx}}$ tanto para $\alpha=10^\circ$ como para $\alpha=45^\circ$ nas configurações de reforços em que se o chanfro na extremidade quando comparados com a configuração em que não se executam os chanfros. Para reparações com $\alpha=10^\circ$ e com a configuração em que se utilizam reforço exterior e interior, observa-se um ligeiro aumento de $P_{\text{máx}}$ para a configuração em que se executa o chanfro comparativamente com a configuração que não se executa o chanfro. Observa-se este comportamento, pois pela análise de tensões é nesta configuração que ocorre a maior redução dos picos de tensão com a execução do chanfro na extremidade do reforço quando comparado com o reforço em que não se executa o chanfro. Para as restantes configurações não se observa variação digna de registo. Apresenta-se na Figura 137 as comparações de $P_{\text{máx}}$ em função de α (a) e de η em função de α (b) para reparações com o adesivo Araldite® AV138 e em reparação nas quais se executam chanfros nas extremidades dos reforços.

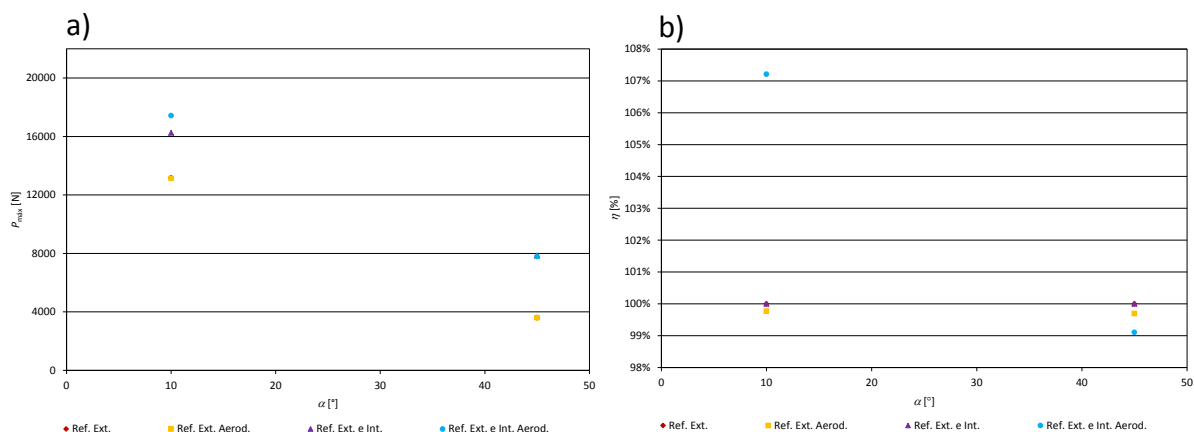


Figura 137 – Comparação de $P_{\text{máx}}$ (a) e de η (b), para o adesivo Araldite® AV138 com um chanfro efetuado na extremidade do reforço.

Para reparações com $\alpha=45^\circ$ pela Figura 137 – (a) e (b) não se observam alterações de $P_{\text{máx}}$ dignas de registo para qualquer configuração de reparação e de reforços, mas para reparações com $\alpha=10^\circ$ e com utilização de reforço exterior e interior observa-se um ligeiro aumento de $P_{\text{máx}}$ para a configuração de reforços em que se executam chanfros nas extremidades comparativamente com reforços em que não se executam chanfros. Pela Figura 137 – (b) para reparações com $\alpha=10^\circ$ e 45° e quando se utiliza apenas reforço exterior não se observa grande variação dos valores de $P_{\text{máx}}$, mas para o caso de ser aplicado tanto

reforço e exterior como interior e com $\alpha=10^\circ$ observa-se um aumento de cerca 7 % a 8 % $P_{\text{máx}}$ com a aplicação do chanfro na extremidade do reforço, enquanto para $\alpha=45^\circ$ se observa uma ligeira diminuição, cerca de 1 %, dos valores da resistência da reparação com a aplicação do chanfro. Esta diferença é observada para ambos os casos de aplicação de reforços. Este comportamento está de acordo com análise das tensões pois as maiores reduções dos picos de tensão observam-se para as reparações com $\alpha=10^\circ$ e com a aplicação de reforço exterior e interior.

5. Conclusões

Neste trabalho estudou-se experimental e numericamente reparações adesivas por remendo embebido, nomeadamente o efeito da utilização de reforços exteriores (em um ou nos dois lados da estrutura), para diferentes ângulos de inclinação. Considerou-se um adesivo dúctil (Araldite® 2015) e outro frágil (Araldite® AV138), o que permitiu abranger processos de rotura bastante distintos. O estudo experimental foi acompanhado por outro numérico no software ABAQUS®, usando modelos coesivos para a previsão numérica da resistência das reparações.

Pela análise dos modos de rotura experimentais observou-se que a rotura foi coesiva para todas as configurações de reparação, pois se verificou a existência de adesivo em todas as faces de ligação. Pelos resultados obtidos no trabalho experimental concluiu-se que houve um aumento de resistência significativo para reparações com reforço exterior (condição 1) e um aumento ainda mais significativo para reparações com reforço exterior e interior (condição 2). Nota-se também um aumento exponencial da resistência com a diminuição do valor de α e que existe um rendimento da reparação na ordem dos 400 % pela diminuição de $\alpha=45^\circ$ para 10° para a condição 1. Para a condição 2 existe um rendimento da reparação na ordem dos 300 % com a diminuição de α . Isto deve-se principalmente ao aumento da

área da colagem. Observou-se que houve rendimento da reparação para a condição 1 em relação às reparações sem reforço na ordem dos 150 % para $\alpha=10^\circ$ e os 154 % para $\alpha=45^\circ$. Para a condição 2 houve um rendimento da reparação entre os 245 % para $\alpha=10^\circ$ e os 375 % para $\alpha=45^\circ$.

De um modo geral pela análise das tensões σ_y e τ_{xy} para a camada de adesivo do remendo concluiu-se que com a diminuição de α reduzem-se as concentrações de tensão nas extremidades dessa camada de adesivo. Com a utilização de reforços exteriores observou-se que os valores da tensão diminuem na extremidade reforçada e aumenta na extremidade não reforçada, comparativamente a reparações não reforçadas e a reparações com a utilização de reforço exterior e interior. Para as camadas de adesivo dos reforços observou-se concentração das tensões nas extremidades livres desses reforços. Com as reduções das tensões σ_y e τ_{xy} concluiu-se que com a diminuição de α se melhora o desempenho das reparações. Com a utilização dos reforços, que também diminuem as tensões σ_y e τ_{xy} , também se concluiu que melhoram o desempenho das reparações para todos os valores de α . Pelas curvas $P-\delta$ numéricas concluiu-se que a rigidez da reparação é praticamente constante até ser atingida a carga máxima e os deslocamentos são lineares, ocorrência que se encontra em concordância com os resultados experimentais. Pela análise da resistência das reparações com o adesivo Araldite® 2015 observou-se um aumento exponencial dos valores de $P_{\text{máx}}$ com a diminuição de α . Para as reparações com $c=10$ mm obtiveram-se melhores resultados do que para as reparações com $c=5$ mm, devido ao aumento da área de sobreposição. O valor mais elevado de $P_{\text{máx}}$ (≈ 18 kN) foi obtido para a reparação com $\alpha=10^\circ$, $c=10$ mm e com a utilização de reforço exterior e interior. Observaram-se melhorias ao nível do rendimento das reparações acima dos 500 %, para $\alpha=45^\circ$, $c=10$ mm e utilização de reforço exterior e interior. Para o adesivo Araldite® AV138 observou-se um aumento exponencial dos valores de $P_{\text{máx}}$ com a diminuição de α e observou-se também que para o caso de não serem aplicados quaisquer reforços este adesivo apresenta maior resistência do que o adesivo Araldite® 2015, porque apesar do adesivo Araldite® AV138 ter um comportamento frágil, tem maior resistência e como as tensões são praticamente constantes para ambos os adesivos, as reparações com o adesivo Araldite® AV138 obtiveram resultados mais elevados de resistência do que as reparações com o adesivo Araldite® 2015.

As reparações com o adesivo Araldite® AV138 que se obtiveram melhores resultados foram aquelas em que se utilizaram reforços exteriores e interiores, com menores valores de α e $c=10$ mm. O valor mais elevado de $P_{\text{máx}}$ (≈ 20 kN) foi obtido para a reparação com $\alpha=10^\circ$, $c=10$ mm e reforço exterior e interior. Também se observaram melhorias ao nível do rendimento das reparações acima dos 300 %, para $\alpha=45^\circ$, $c=10$ mm e utilização tanto de reforço exterior e interior. Pela comparação do trabalho numérico com o trabalho experimental concluiu-se que para a maior parte das configurações de reparação o valor de $P_{\text{máx}}$ para o trabalho numérico é inferior aos valores médios obtidos de $P_{\text{máx}}$ para o trabalho experimental. No entanto a diferença máxima dos resultados obtidos entre o trabalho experimental e numérico é de aproximadamente 25 % para a reparação com o adesivo Araldite® AV2015, $\alpha=10^\circ$, $c=5$ mm e com a utilização de reforço exterior e para a reparação com $\alpha=45^\circ$, $c=5$ mm e com a utilização de reforço exterior e interior a diferença máxima é de aproximadamente 10 %. Conclui-se que o método numérico de previsão da resistência considerado neste trabalho se encontra validado, logo estes modelos podem ser usados para a previsão do comportamento da resistência da reparação através de simulação numérica no *software* ABAQUS®.

Na otimização da geometria das reparações e para o caso em que se varia a espessura do reforço conclui-se que com o aumento da espessura dos reforços diminuem-se os valores das tensões σ_y e τ_{xy} para a camada de adesivo do remendo e que para a camada de adesivo dos reforços se aumentam os valores da tensão. Pela resistência das reparações conclui-se que não existiu alteração de $P_{\text{máx}}$ da reparação digna de registo, tanto para valores de $\alpha=10^\circ$ e 45° com o aumento da espessura do reforço, para configurações de reparação em que se utiliza apenas reforço exterior. Também se conclui que existe aumento de $P_{\text{máx}}$ da reparação com o aumento da espessura do reforço para reparações com $\alpha=10^\circ$ e com a utilização de reforço exterior e interior, para reparações com $\alpha=45^\circ$ e com a mesma configuração de reforço não se observa variação dos valores de $P_{\text{máx}}$ da reparação. Observou-se que existe variação de cerca de 15 % a 16 % dos valores de $P_{\text{máx}}$ com o aumento da espessura do reforço para as reparações com $\alpha=10^\circ$. Também se observou que para reparações com $\alpha=45^\circ$ e com a mesma configuração de reforço, existe variação dos valores de $P_{\text{máx}}$ da reparação na ordem dos 3 % a 4 %. Para reparações com o adesivo Araldite® AV138 e $\alpha=10^\circ$,

conclui-se que com o aumento da espessura do reforço de 0,5 mm para 1 mm existe uma ligeira redução de $P_{m\acute{a}x}$ e quando se aumenta a espessura do reforço de 1 mm para 2 mm também se conclui que existe uma maior redução do valor de $P_{m\acute{a}x}$. Este comportamento deve-se ao facto de o adesivo Araldite® AV138 possuir um comportamento frágil e da rigidez da reparação aumentar com o aumento da espessura do reforço o que origina uma menor tolerância da reparação à deformação quando solicitada por tração. Para reparações com $\alpha=45^\circ$ conclui-se que com o aumento da espessura dos reforços praticamente não modifica a rigidez da reparação, quer se utilize apenas reforço exterior ou ambos os reforços. No regime plástico observa-se que com o aumento da espessura do reforço, a deformação da reparação diminui e que existe uma queda repentina da carga, que corresponde a uma rotura catastrófica, característica típica de materiais com comportamento frágil. Com o aumento da espessura do reforço observou-se que o valor de $P_{m\acute{a}x}$ da reparação aumenta. Ao contrário do que se observou para reparações com $\alpha=10^\circ$, nas reparações com $\alpha=45^\circ$ observou-se um aumento da resistência da reparação com o aumento da espessura do reforço, este comportamento ocorre pois não se observou grande alteração da rigidez da reparação, comparativamente a reparações com $\alpha=10^\circ$ e também porque a deformação da reparação com $\alpha=45^\circ$ no instante em que se atinge o valor máximo da resistência é relativamente inferior do que para reparações com $\alpha=10^\circ$. Pela análise do rendimento da reparação concluiu-se que para $\alpha=10^\circ$ existe redução de cerca de 4 % a 7 % de $P_{m\acute{a}x}$ e para um $\alpha=45^\circ$ existe variação de cerca de 3 % a 5 % de $P_{m\acute{a}x}$. Na comparação de $P_{m\acute{a}x}$ em função de α com o aumento da espessura dos reforços, para reparações com o adesivo Araldite® AV138 e com a utilização de reforços exteriores concluiu-se que para $\alpha=10^\circ$ existe um aumento dos valores de $P_{m\acute{a}x}$, com a diminuição da espessura do reforço, e que para $\alpha=45^\circ$ existe um aumento dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ com o aumento da espessura do reforço. Observou-se ainda uma variação de cerca de 10 % a 13 % de $P_{m\acute{a}x}$ quando se varia a espessura do reforço e que à medida que se reduz a espessura dos reforços aumentam-se os valores de $P_{m\acute{a}x}$. Para $\alpha=45^\circ$ observou-se uma variação de cerca de 12 % a 15 % de $P_{m\acute{a}x}$ com o aumento da espessura dos reforços e que à medida que se aumenta a espessura dos reforços aumenta-se também $P_{m\acute{a}x}$.

Pela otimização da geometria das reparações em que se executam chanfros nas extremidades dos reforços, conclui-se quer para a análise das tensões como pela análise das resistências das reparações, que com a execução dos chanfros não se introduzem variações de valores dignas de registo. Portanto e sempre que seja necessário considerar a perturbação aerodinâmica causada pelo uso de reforços exteriores, pode-se utilizar esta técnica pois não influencia o comportamento da reparação.

Para a realização de trabalhos futuros propõem-se as seguintes hipóteses:

- Estudo da variação da espessura da camada de um adesivo de Poliuretano de elevada resistência, na extremidade em que não se utiliza o reforço, esta proposta só é válida para as configurações em que se utilizam apenas reforços exteriores.
 - Propõe-se também um estudo mais detalhado da influência na reparação causada pela variação da espessura dos reforços.
 - Realização de simulações numéricas com leis de dano mais adequadas para adesivos dúcteis, como a trapezoidal.
-

Referências

- 1 Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*, New York, McGraw Hill Companies Inc. (2000).
 - 2 Pinto A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. Tese de doutoramento, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto (2007).
 - 3 Da Silva L.F.M., Magalhães A.G., Moura M.F.S.F., *Juntas Adesivas Estruturais*. Porto: Publindústria (2007).
 - 4 <http://members.kos.net/sdgagnon/ph.html>, consultado em 28/08/2013.
 - 5 <http://www.adhesiveandglue.com/adhesive-applications.html>, consultado em 27/08/2013.
 - 6 Ribeiro N.F.Q.R., *Efeito de alterações geométricas na resistência de juntas de sobreposição*. Tese de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto (2012).
 - 7 de Moura M.F.S.F., de Moraes A.B., and de Magalhães A.G., *Materiais compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. (2005), Porto: Publindústria. 369.
 - 8 Magalhães A.G.M., *Aplicação das Técnicas de Emissão Acústica e Radiografia na Caracterização do Dano Produzido por Fluência em Juntas de Materiais Compósitos Sujeitas a Diferentes Condições Ambientais*. Dissertação de Doutoramento, DEMEGI-FEUP, Porto, (1999).
 - 9 Pocius A.V., *Adhesion and Adhesives Technology, An Introduction, 2nd Edition*. 83, (2002); Hanser. 311 – 319.
 - 10 Gauthier M.M., *Sorting out structural adhesives*. Advanced Materials & Processes 138 (1990); ASM International.
 - 11 Esteves J.L.S., *Estudo do comportamento de adesivos estruturais*. FEUP (1990).
 - 12 He X., *A review of element analysis of adhesively bonded joints*. International Journal of Adhesion & Adhesives 31, (2011); 248 – 264.
 - 13 <http://www.olympus-ims.com/en/applications/multi-mode-adhesive-bond-testing/>, consultado em 28/08/2013.
 - 14 <http://www.akfix.com/sayfalar.asp?LanguageID=2&cid=2&id=14&id2=66&b=detay>. Consultado em 28/08/2013.
 - 15 http://solutions.3m.co.uk/wps/portal/3M/en_GB/EU-Auto/Home/ExploreOur/ProductFamilies/AcrylicFoamTape/, consultado em 28/08/2013.
 - 16 <http://machinedesign.com/archive/uv-cure-adhesives-101>, consultado em 28/08/2013.
-

- 17 <http://www.alueurope.eu/wp-content/uploads/2012/01/AAM-Joining-6-Adhesive-bonding.pdf>, consultado em 09/09/2013.
 - 18 Adams R.D., Comyn J. *Joining using adhesives*. Assembly Automation, (2000).
 - 19 Neto J.A.B.P., *Estudo Paramétrico de Juntas Adesivas em Material Compósito*. Tese de mestrado, Departamento de Engenharia. Mecânica, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, (2011).
 - 20 Gonçalves J.P.M., *Contribuições para a Análise Numérica e Experimental do Comportamento de Juntas de Sobreposição Simples*. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia do Porto, Porto, (2000).
 - 21 Her S.C., *Stress analysis of adhesively-bonded lap joints*. Composite Structures, (1999); 47: p. 673-678.
 - 22 Yeh H.Y. and Tandjung D., *Mixed mode fracture analysis of the lap shear specimen test per ASTM D1002*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, (2005); 24: p. 839-853.
 - 23 Campilho R.D.S.G., Moura M.F.S.F., Domingues J.J.M.S., *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. Composites Science and Technology, (2005); 65: 1948-1958.
 - 24 Pinto A.M.G., Magalhães A.G., Gomes da Silva F., and Monteiro Baptista A.P., *Shear strength of adhesively bonded polyolefins with minimal surface preparation*. International Journal of Adhesion and Adhesives, (2008); 28: p. 452-456.
 - 25 Andruet R.H., Dillard D.A., and Holzer S.M., *Two- and three-dimensional geometrical nonlinear finite elements for analysis of adhesive joints*. International Journal of Adhesion & Adhesives, (2001); 21: p. 17-34.
 - 26 Sheppard A., Kelly D., and Tong L., *A damage zone model for the failure analysis of adhesively bonded joints*. International Journal of Adhesion & Adhesives, (1998); 18:385-400.
 - 27 Tzetzis D. and Hogg P.J., *Experimental and finite element analysis on the performance of vacuum-assisted resin infused single scarf repairs*. Materials and Design, (2008); 29: p. 436-449.
 - 28 Baker A.A., *Advances in the Bonded Composite Repair of Metallic Aircraft Structure Volume 2*, Elsevier Science Ltd, (2002).
 - 29 Campilho R.D.S.G., *Repair of Composite and Wood Structures*. Doctoral degree thesis, Department of Mechanical Engineering and Industrial Management, Faculty of Engineering of Porto University, Oporto, (2009).
 - 30 Naveen Rastogi, B.P. Deepak, and Som R. Soni., *Stress Analysis Codes for Bonded Joints in Composite Structures*. AIAA-(1997); 1341, Collection of Technical Papers, Pt. 4 (A97-24112 05-39).
-

- 31 Shih-Pin C., *Finite element application for Strength analysis of scarf-patch-repaired composite laminates*. Master thesis, Department of Aerospace Engineering, Graduate School of Wichita State University, (2006).
 - 32 Zhang Y., Keller T., *Progressive failure process of adhesively bonded joints composed of pultruded GFRP*. Composites Science and Technology, (2008); 68: 461-470.
 - 33 Hu F.Z., Soutis C., Edge E.C., *Inter laminar stresses in composite laminates with a circular hole*. Composite Structures, (1997); 37: 223-232.
 - 34 Li G., Lee-Sullivan P., Thring R.W., *Nonlinear finite element analysis of stress and strain distributions across the adhesive thickness in composite single-lap joints*. Composite Structures, (1999); 46: 395-403.
 - 35 Osnes H., Andersen A., *Computational analysis of geometric nonlinear effects in adhesively bonded single lap joints*. Composites: Part B – Engineering, (2003); 34: 417-427.
 - 36 Radice J., Vinson J., *On the use of quasi-dynamic modeling for composite material structures: analysis of adhesively bonded joints with midplane asymmetry and transverse shear deformation*. Composites Science and Technology, (2006); 66: 2528-2547.
 - 37 Luo Q., Tong L., *Fully-coupled nonlinear analysis of single lap adhesive joints*. International Journal of Solids and Structures, (2007); 44: 2349-2370.
 - 38 Volkersen O., *Die nietkrafteerteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten*. Luftfahrtforschung, (1938); 15: 41-47.
 - 39 Adams R.D., Comyn J.C., Wake W.C., *Structural adhesive joints in engineering*. Second Edition. Chapman & Hall: London, UK; (1997).
 - 40 Zou G.P., Shalin K., Taheri F., *An analytical solution for the analysis of symmetric composite adhesively bonded joints*. Composite Structures, (2004); 65: 499-510.
 - 41 Hu F.Z., Soutis C., *Strength prediction of patch repaired CFRP laminates loaded in compression*. Composites Science and Technology, (2000); 60: 1103-1114.
 - 42 Owens J.F.P., Sullivan P.L., *Stiffness behaviour due to fracture in adhesively bonded composite-to-aluminium joints I. Theoretical model*. International Journal of Adhesion & Adhesives, (2000); 20: 39-45.
 - 43 Owens J.F.P., Sullivan P.L., *Stiffness behaviour due to fracture in adhesively bonded composite-to-aluminium joints II. Experimental*. International Journal of Adhesion & Adhesives, (2000); 20: 47-58.
 - 44 Campilho R.D.S.G., *Modelação da Execução de Reparações em Materiais Compósitos*. M.Sc. Thesis. Porto, Portugal: Department of Mechanical Engineering and Industrial Management, Engineering Faculty of Porto University, (2005).
 - 45 Fernlund G., Papini M., McCammond D., Spelt J.K., *Fracture load predictions for adhesive joints*. Composites Science and Technology, (1994); 51: 587-600.
-

- 46 Tong L., Sheppard A., Kelly D., *Relationship between surface displacement and adhesive peel stress in bonded double lap joints*. International Journal of Adhesion & Adhesives, (1995); 15: 43-48.
 - 47 Kinloch A.J., *Adhesion and adhesives*. Chapman & Hall: London, UK; 1990.
 - 48 Volkersen O., *Recherches sur la theorie des assemblages collés*. Construction Metallique, (1965); 4: 3-13.
 - 49 Adams R.D., Peppiatt N.A., *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. Journal of Strain Analysis, (1974); 9: 185-196.
 - 50 Soutis C., Duan D.M., Goutas P., *Compressive behaviour of CFRP laminates repaired with adhesively bonded external repairs*. Composite structures, (1999); 45: 289-301.
 - 51 Helms J.E., Li G., Pang S.S., *Buckling analysis of a taper-taper adhesive-bonded composite joint*. Polymer Composites, (2003); 24: 45-52.
 - 52 Kumar S.B., Sridhar I., Sivashanker S., Osiyemi S.O., Bag A., *Tensile failure of adhesively bonded CFRP composite scarf joints*. Materials Science and Engineering, (B 2006); 132: 113-120.
 - 53 Campilho R.D.S.G., de Moura M.F.S.F., Pinto A.M.G., Morais J.J.L., Domingues J.J.M.S., *Modelling the tensile fracture behaviour of CFRP scarf repairs*. Composites: Part B – Engineering, (2009); 40: 149-157.
 - 54 Mortensen F., Thomsen O.T., *Simplified linear and non-linear analysis of stepped and scarfed adhesive-bonded lap-joints between composite laminates*. Composite Structures, (1997); 38: 281-294.
 - 55 Wang C.H., Gunnion A.J., *On the design methodology of scarf repairs to composite laminates*. Composites Science and Technology, (2008); 68: 35-46.
 - 56 Campilho R.D.S.G, Moura M.F.S.F, Domingues J.J.M.S., *Stress and failure analyses of scarf repaired CFRP laminates using a cohesive damage model*. Journal of Adhesion Science and Technology, (2007); Vol. 21, No. 9. Pp. 855-870.
 - 57 Fredrickson B.M., Schoeppner G.A., Mollenhauer D.H., Palazotto A.N., *Application of three-dimensional spline variational analysis for composite repair*. Composite Structures, (2008); 83: 119-130.
 - 58 Das M., Madenci E., Ambur D.R., *Three-dimensional nonlinear analyses of scarf repair in composite laminates and sandwich panels*. Journal of the Mechanics of Materials and Structures, (2008); 3:1 641-1658.
 - 59 Tomblin J.S., Salah L., Welch J.M., Borgman M.D., *Bonded repair of aircraft composite sandwich structures*. Report PB2004-105463. Wichita, USA. Boeing Co, (2004).
 - 60 Kumar S.B., Sivashanker S., Bag A., Sridhar I., *Failure of aerospace composite scarf-joints subjected to uniaxial compression*. Materials Science and Engineering: A, (2005); 412:117-122.
 - 61 Imanaka M., Fujinami A. and Suzuki Y., *J. Mater. Sci.* 35, (2000); 2481–2491.
 - 62 Imanaka M. and Suzuki Y., *J. Adhesion Sci. Technol.* 16, (2002); 1687–1700.
-

-
- 63 Objois A., Assih J., Troalen J.P., *Theoretical Method to Predict the First Microcracks in a Scarf Joint*. The Journal of Adhesion, (2005); 81:893-909.
- 64 Objois A., Fargette B. and Gilibert Y., *The influence of the bevel angle on the micro-mechanical behaviour of bonded scarf joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, Vol. 14, No. 8, (2000); Pp. 1057-1070.
- 65 Du J., Salmon F.T., Pocius A.V., *Modeling of cohesive failure processes in structural adhesive bonded joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, (2004); 18:287–99.
- 66 Odi R.A., Friend C.M., *A comparative study of finite element models for the bonded repair of composite structures*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, (2002); 21:311–32.
- 67 Soutis C, Hu F.Z., *Repair design of composites and efficiency of scarf patch repairs*. In: Proceedings of the 11th international conference on composite materials. Melbourne, Australia, 14–18 July (1997).
- 68 Pinto A.M.G., Campilho R.D.S.G., De Moura M.F.S.F. and Mendes I.R., *Numerical Evaluation of Three-Dimensional Scarf repairs in Carbon-Epoxy Structures*. International Journal of Adhesion & Adhesives 30, (2010); 329-337.
- 69 Campilho R.D.S.G., De Moura M.F.S.F., Pinto A.M.G., Ramantani D.A., Morais J.J.L. and Domingues J.J.M.S., *Strength Prediction of Adhesively-Bonded Scarf Repairs in Composite Structures under Bending*. Materials Science Forum, Vols. 636-637, (2010); Pp. 233-238.
- 70 Gleich D.M., Van Tooren M.J.L. and De Haan P.A.J., *Shear and Peel Stress Analysis of an Adhesively Bonded Scarf Joint*. Journal of Adhesion Science and Technology, Vol. 14, No. 6, (2000); Pp. 879-893.
- 71 Harman A.B., Wang C.H., *Improved Design Methods for Scarf Repairs to Highly Strained Composite Aircraft Structure*. Composite Structures 75, (2006); 132-144.
- 72 Whittingham B., Baker A.A., Harman A., Bitton D., *Micrographic studies on adhesively bonded scarf repairs to thick composite aircraft structure*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, (2009); 90:1419–32.
- 73 Harris J.A., Adams R.D., *Strength prediction of bonded single-lap joints by nonlinear finite element methods*. Int. J. Adhes. & Adhes. 4, (1984); 65 – 78.
- 74 Sosa J.L.C., Karapurath N., *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. Composites Science and Technology 72, (2012); 788 – 791.
- 75 Goland M., Reissner E., *The stresses in cemented joints*. Journal of Applied Mechanics 66, (1944); 17 – 27.
- 76 Hart-Smith L.J., *Stress analysis: a continuum mechanics approach*. In: Developments in Adhesives, (1973).
- 77 Penado F.E., *A simplified method for the geometrically nonlinear analysis of the single lap joint*. Journal of Thermoplastic Composite Materials 11, (1998); 272 – 287.
-

- 78 Panigrahi S.K., Pradhan B., *Three dimensional failure analysis and damage propagation behavior of adhesively bonded single lap joints in laminated FRP composites*. Journal of Reinforced Plastics and Composites 26, (2007); 183 – 201.
 - 79 Williams M.L., *The stress around a fault or crack in dissimilar media*. Bull Seism Soc. Of America 49, (1959); 199 – 204.
 - 80 Fernlund G., Spelt J.K. *Failure load prediction*. Int. J. Adhes. & Adhes. 11, (1991); 213 – 227.
 - 81 Duan K., Hu X., Mai Y.W., *Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints*. J. Adhes. Sci. Technol. 18, (2004); 39 – 53.
 - 82 Barenblatt G.I., *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypothesis. Axisymmetrical cracks*. J. Appl. Math. Mech. 71, (1959); 622 – 636.
 - 83 Feraren P., Jensen H.M., *Cohesive zone modelling of interface fracture near flaws in adhesive joints*. Eng. Fract. Mech. 71, (2004); 2125 – 2142.
 - 84 Grant L.D.R., Adams R.D., da Silva L.F.M., *Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry*. Int. J. A. A. 29, (2009); 405 – 413.
 - 85 Khoramishad H., Crocombe A.D., Katnam K.B., Ashcroft I.A., *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. Int. J. Fatigue 32, (2010); 1146 – 1158.
 - 86 Daudeville L., Ladeveze P., *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Compos. Struct. 25, (1993); 547 – 555.
 - 87 Voyiadjis G.Z., Kattan P.I., *Damage Mechanics*. Marcell Dekker, New York, (2005).
 - 88 Shenoy V., Ashcroft I.A., Critchlow G.W., Crocombe A.D., *Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue*. Eng. Fract. Mech. 77, (2010b); 1073 – 1090.
 - 89 Mohammadi S., *Extended finite element method for fracture analysis of structures*. Blackwell Publishing, New Jersey 46, (2008); 131 – 150.
 - 90 Belytschko T., Black T., *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. Int. J. Fract. Mech. 45, (1999); 601 – 620.
 - 91 Moës N., Dolbow J., Belytschko T., *A finite element method for crack growth without remeshing*. Int. J. Numer. Meth. Eng. 46, (1999); 131 – 150.
 - 92 Campilho R.D.S.G., Banea M.D., Chaves F.J.P., Da Silva L.M.F., *Extended finite element method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. Computational Materials Science 50, (2011); 1543 – 1549.
 - 93 Campilho R.D.S.G., Banea M.D., Pinto A.M.G., Da Silva L.F.M., De Jesus A.M.P., *Strength prediction of single-lap and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. International Journal of Adhesion & Adhesives 31, (2011); 363 – 372.
 - 94 Campilho R.D.S.G., Pinto A.M.G., Banea M.D., Silva R.F., Da Silva L.F.M., *Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry*. Journal of Adhesion Science and Technology, (2011); 25: 2351-2368.
-

-
- 95 http://www.lanema.pt/cms_imgs/d754fab492071ede9f6be1602c1ee290.pdf, consultado em 10/12/2012.
- 96 https://www.huntsmanservice.com/WebFolder/ui/browse.do?pFileName=/opt/TDS/Huntsman%20Advanced%20Materials/English/Long/Araldite%202015_eur_e.pdf, consultado em 10/12/2012.
- 97 https://www.huntsmanservice.com/WebFolder/ui/browse.do?pFileName=/opt/TDS/Huntsman%20Advanced%20Materials/English/Long/Araldite%20AV%20138M-1%20Hardener%20HV%20998_eur_e.pdf, consultado em 10/12/2012.
- 98 Da Silva J.P.M., *Estudo de reparações adesivas pela técnica de remendo embebido*. Tese de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, (2012).
- 99 Harper C.A., *Handbook of Plastics, elastomers and Composites 4th edition*. McGraw Hill Companies Inc., (2004).
- 100 Adams R.D. and Peppiatt N.A., *J. Strain Analysis Eng. Design* 9, (1974); 185.
- 101 Tvergaard V., Hutchinson J.W., *On the toughness of ductile adhesive joints*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, (1996); 44:789-800.
- 102 Chen J., Crisfield M., Kinloch A.J., Busso E.P., Matthews F.L., Qiu Y., *Predicting progressive delamination of composite material specimens via interface elements*. Mechanics of Advanced Materials and Structures, (1999); 6:301-317.
- 103 Yang Q.D., Thouless M.D., *Mixed-mode fracture analyses of plastically deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture, (2001); 110:175-187.
- 104 Campilho R.D.S.G., Banea M.D., Neto J.A.B.P., da Silva L.F.M., *Modelling of single-lap joints using cohesive zone models: effect of the cohesive parameters on the output of the simulations*. J. Adhesion 88, (2012); 513-533.
- 105 Jing J., Gao F., Johnson J., Liang F.Z., Williams R.L., Qu J., *Simulation of dynamic fracture along solder-pad interfaces using a cohesive zone model*. Engineering Failure Analysis, (2009); 16:1579-1586.
- 106 Gonçalves J.P.M., Moura M.F.S.F., Magalhães A.G., Castro P.M.S.T., *Application of interface finite elements to three-dimensional progressive failure analysis of adhesive joints*. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, (2003); 26:479–86.
- 107 Andersson T., Stigh U., *The stress-elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces*. International Journal of Solids and Structures, (2004); 41:413–34.
- 108 Leffler K., Alfredsson K.S., Stigh U., *Shear behaviour of adhesive layers*. International Journal of Solids and Structures, (2007); 44:530–45.
- 109 Hogberg J.L., Stigh U., *Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer*. Engineering Fracture Mechanics, (2006); 73:2541–56.
- 110 Moura M.F.S.F., Gonçalves J.P.M., Chousal J.A.G., Campilho R.D.S.G., *Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical*
-

- behaviour of bonded joints*. International Journal of Adhesion & Adhesives, (2008); 28:419–26.
- 111 Campilho R.D.S.G., Banea M.D., Pinto A.M.G., Silva L.F.M., de Jesus A.M.P., *Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modeling*. International Journal of Adhesion & Adhesives, (2011); 31:363–372.
- 112 Marques E.A.S., Silva L.F.M., *Joint strength optimization of adhesively bonded patches*. International Journal of Adhesion & Adhesives, (2008); 84:917–36.
- 113 Campilho R.D.S.G., Moura M.F.S.F., Ramantani D.A., Morais J.J.L., Domingues J.J.M.S., *Tensile behaviour of three-dimensional carbon-epoxy adhesively bonded single- and double-strap repairs*. International Journal of Adhesion & Adhesives, (2009); 29: 678–686.
- 114 Campilho R.D.S.G., Banea M.D., Neto J.A.B.P., Silva L.F.M., *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. International Journal of Adhesion & Adhesives, (2013); 44:48–56.
- 115 Ashby M.F., *Materials selection in mechanical design*. Butterworth-Heinemann, third Ed., (2005).
-

Apêndice 1 Modos de Rotura Experimentais

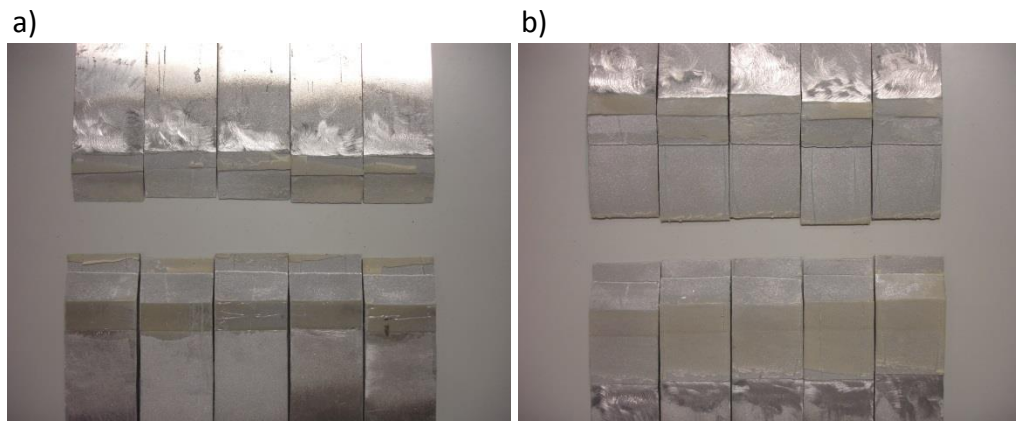


Figura 138 – Provete de $\alpha=15^\circ$ condição 1 (a), e condição 2 (b), após a realização do ensaio de tração.

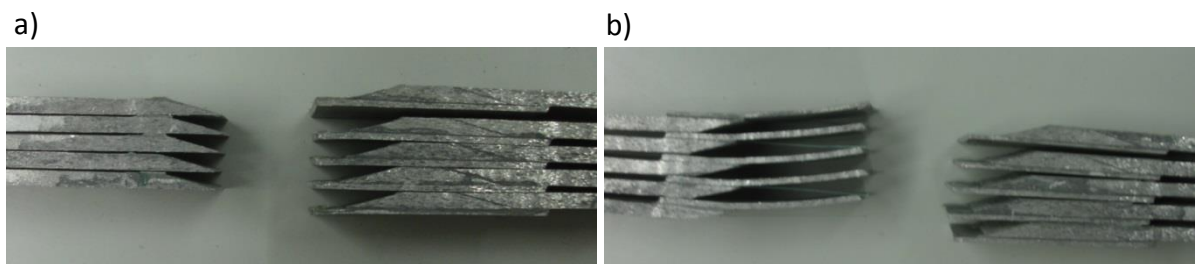


Figura 139 – Vista de perfil de provetes de $\alpha=15^\circ$ condição 1 (a), e condição 2 (b), após a realização do ensaio de tração.

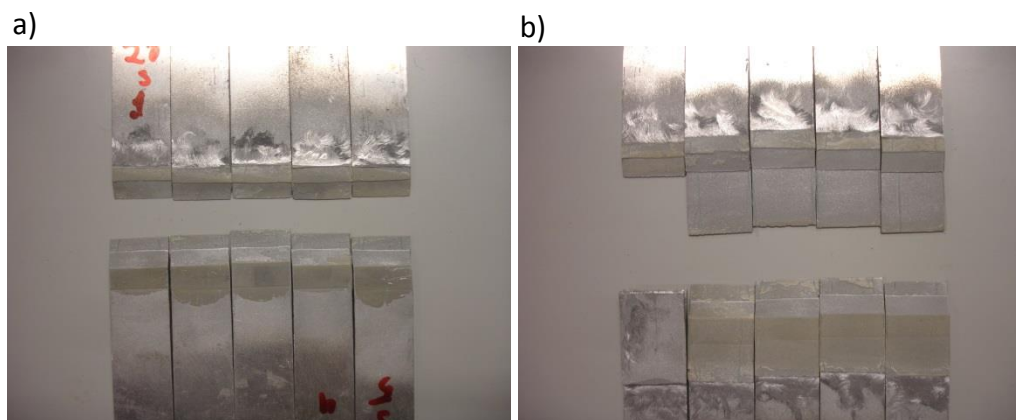


Figura 140 – Provete de $\alpha=20^\circ$ condição 1 (a), e condição 2 (b), após a realização do ensaio de tração.

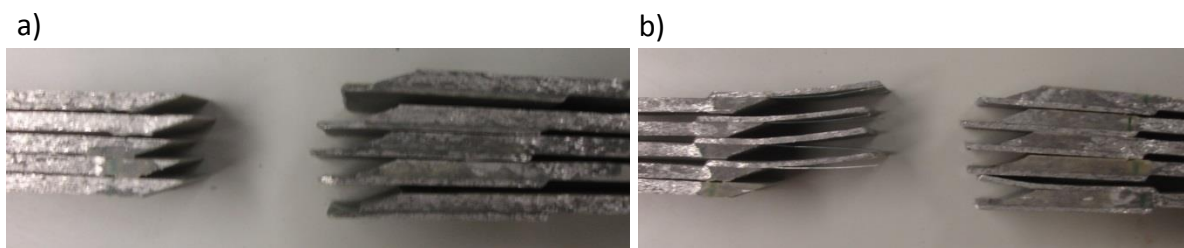


Figura 141 – Vista de perfil de provetes de $\alpha=20^\circ$ condição 1 (a), e condição 2 (b), após a realização do ensaio de tração.

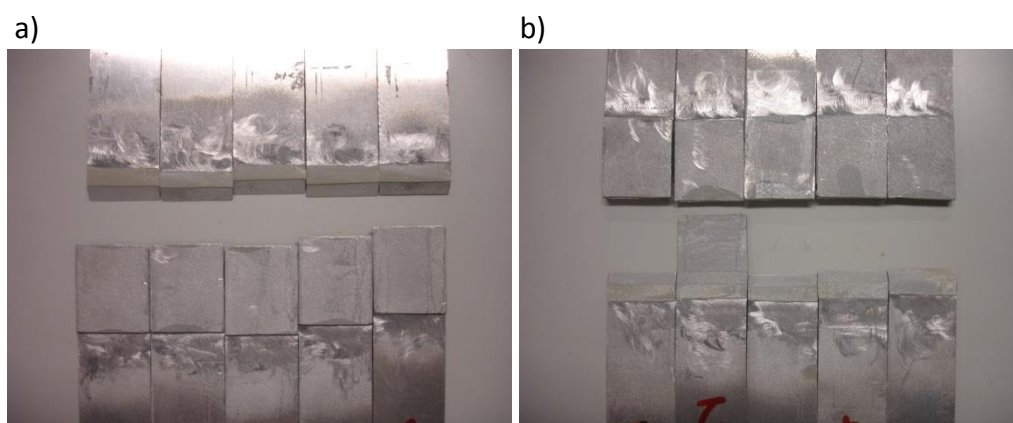


Figura 142 – Provates de $\alpha=30^\circ$ condição 1 (a), e condição 2 (b), após a realização do ensaio de tração.

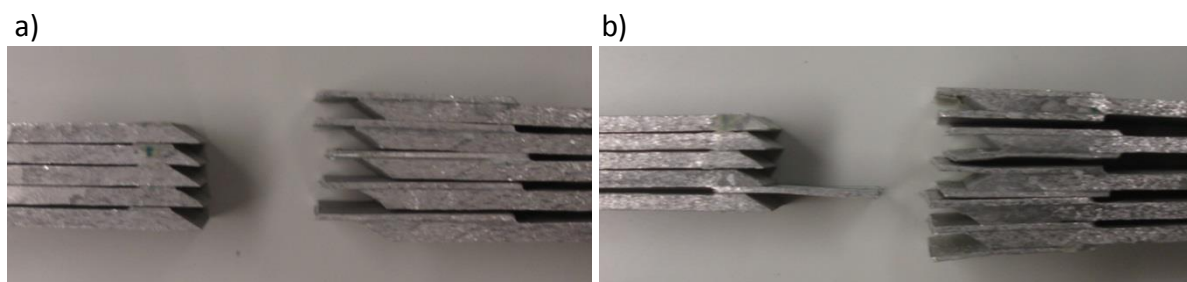


Figura 143 – Vista de perfil de provetes de $\alpha=30^\circ$ condição 1 (a), e condição 2 (b), após a realização do ensaio de tração.

Apêndice 2 Curvas P – δ Experimentais

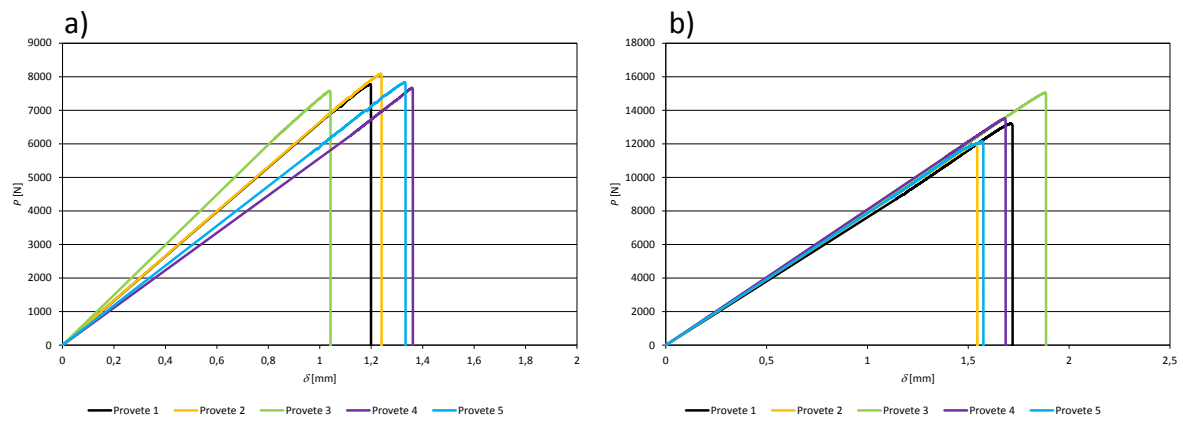


Figura 144 – Curvas P – δ experimentais para $\alpha=15^\circ$ condição 1 (a), e condição 2 (b).

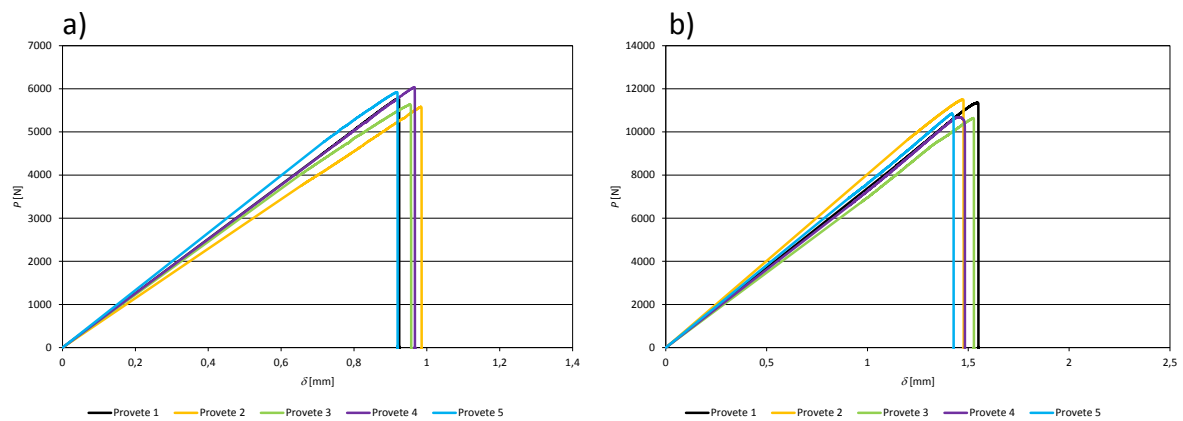


Figura 145 – Curvas P – δ experimentais para $\alpha=20^\circ$ condição 1 (a), e condição 2 (b).

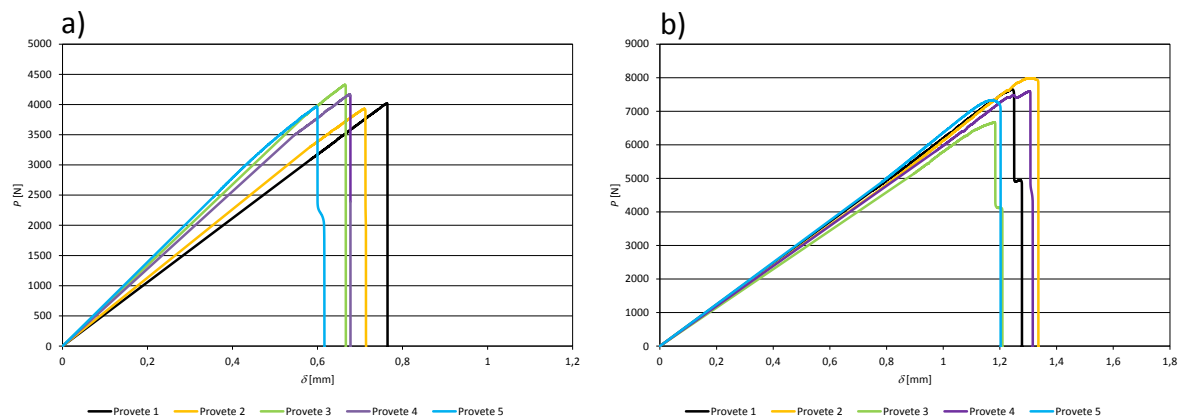


Figura 146 – Curvas P – δ experimentais para $\alpha=30^\circ$ condição 1 (a), e condição 2 (b).

Apêndice 3 Resultados Tensões de Arrancamento σ_y

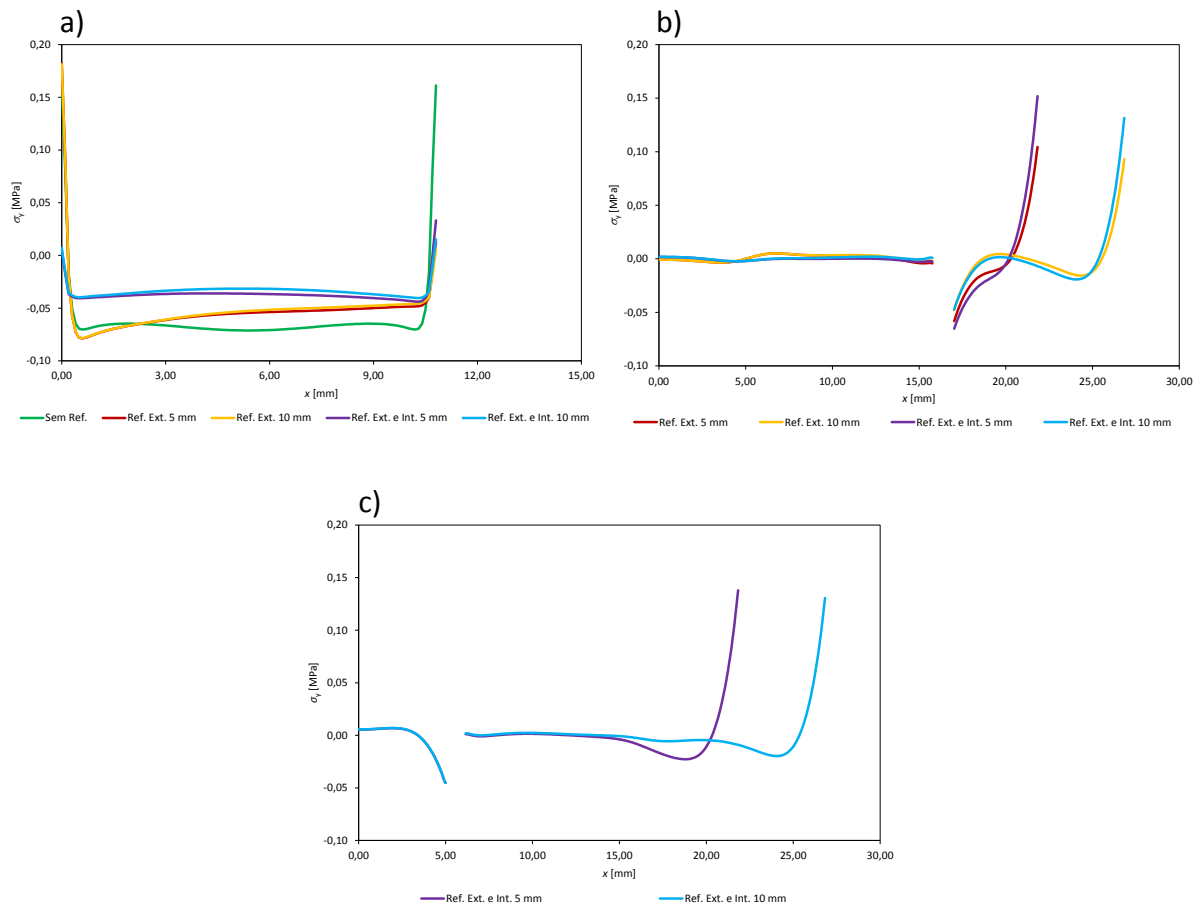


Figura 147 – Tensão de arrancamento σ_y , com $\alpha=15^\circ$ para as diferentes configurações de reparação da camada de adesivo do remendo (a), do reforço exterior (b) e do reforço interior (c).

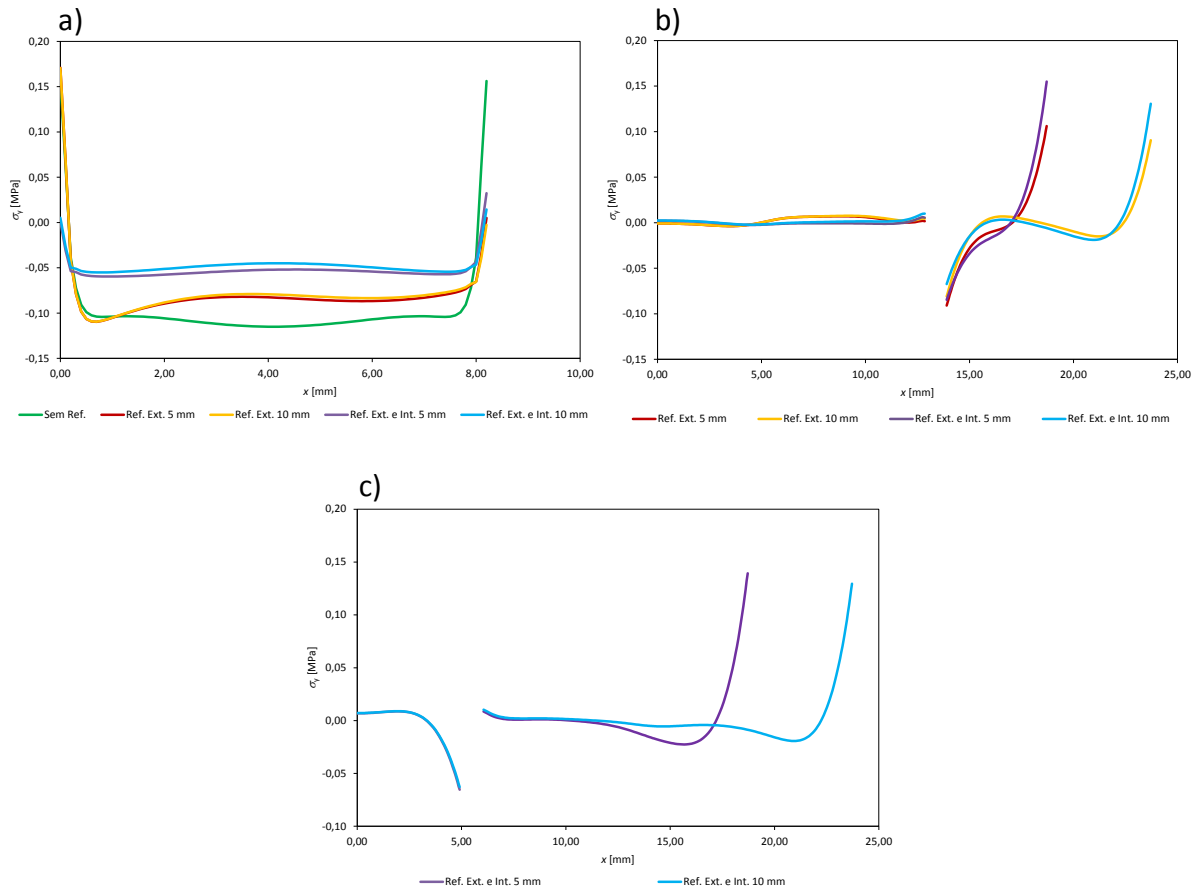


Figura 148 – Tensão de arrancamento σ_y , com $\alpha=20^\circ$ para as diferentes configurações de reparação da camada de adesivo do remendo (a), do reforço exterior (b) e do reforço interior (c).

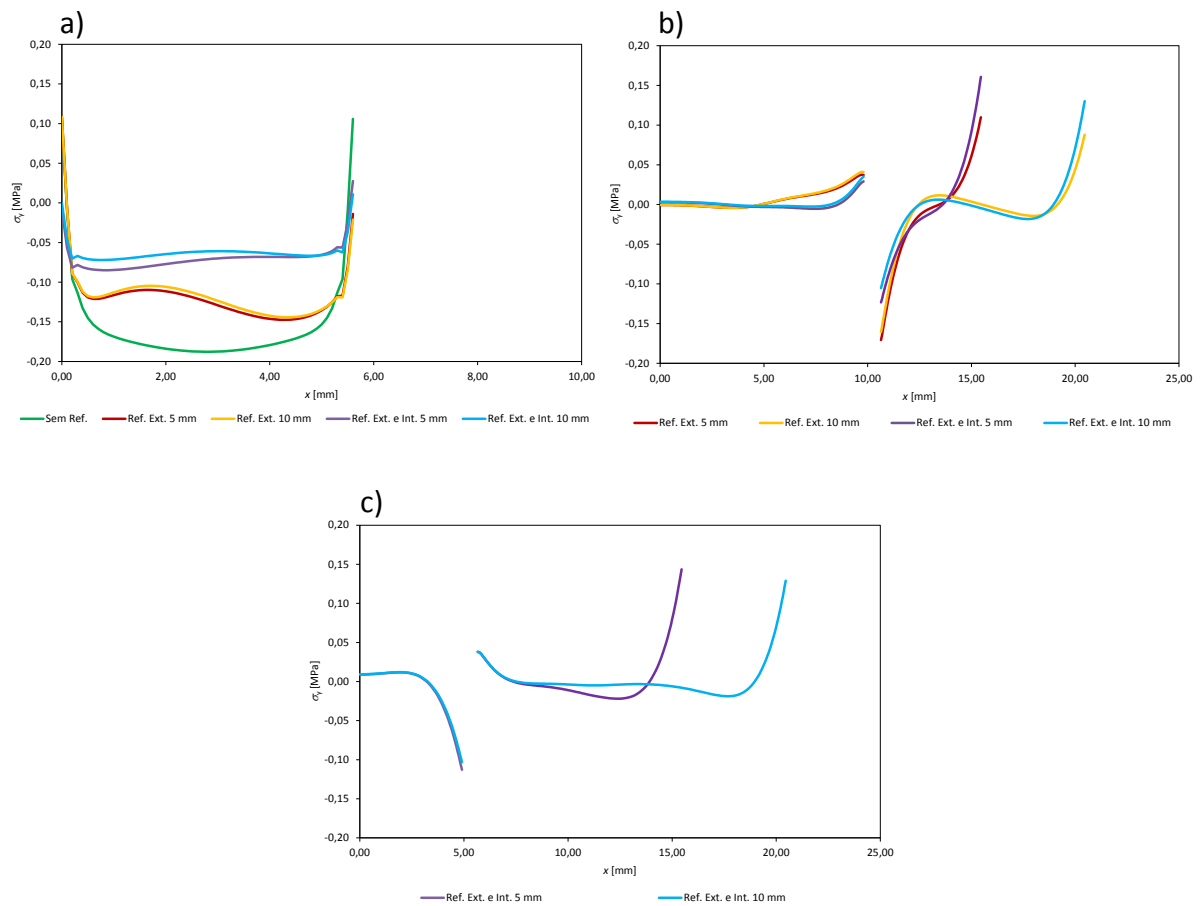


Figura 149 – Tensão de arrancamento σ_y , com $\alpha=30^\circ$ para as diferentes configurações de reparação da camada de adesivo do remendo (a), do reforço exterior (b) e do reforço interior (c).

Apêndice 4 Resultados Tensões de Corte τ_{xy}

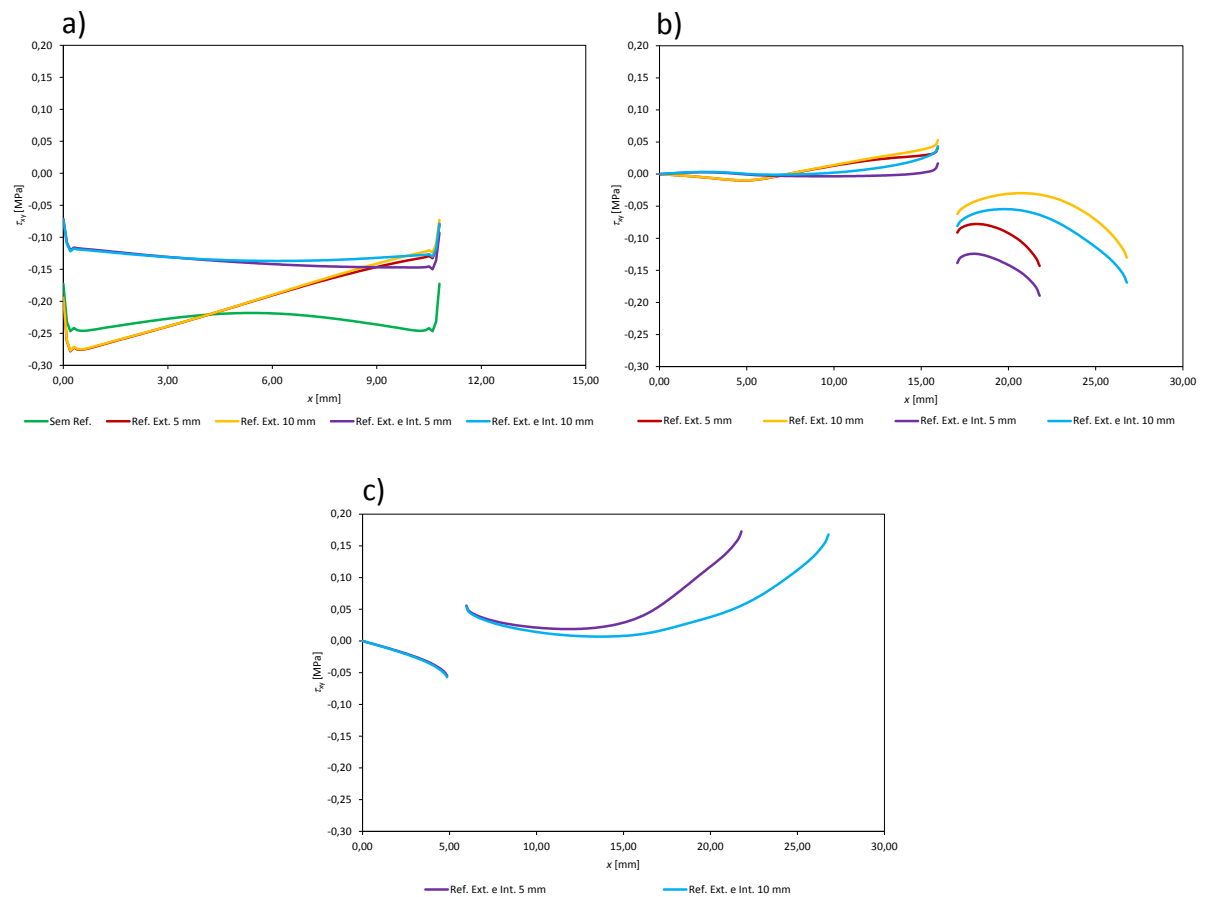


Figura 150 – Tensão de corte τ_{xy} , com $\alpha=15^\circ$ para as diferentes configurações de reparação da camada de adesivo do remendo (a), do reforço exterior (b) e do reforço interior (c).

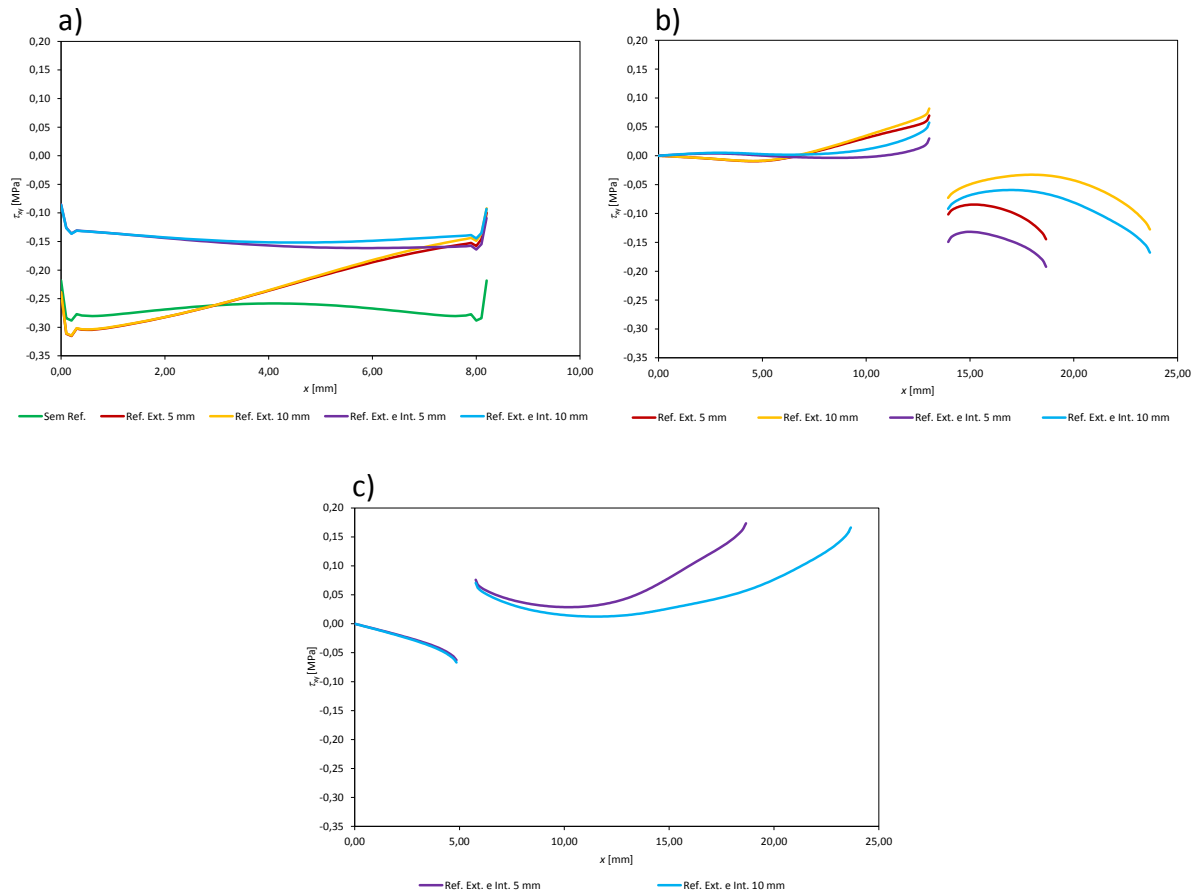


Figura 151 – Tensão de corte τ_{xy} , com $\alpha=20^\circ$ para as diferentes configurações de reparação da camada de adesivo do remendo (a), do reforço exterior (b) e do reforço interior (c).

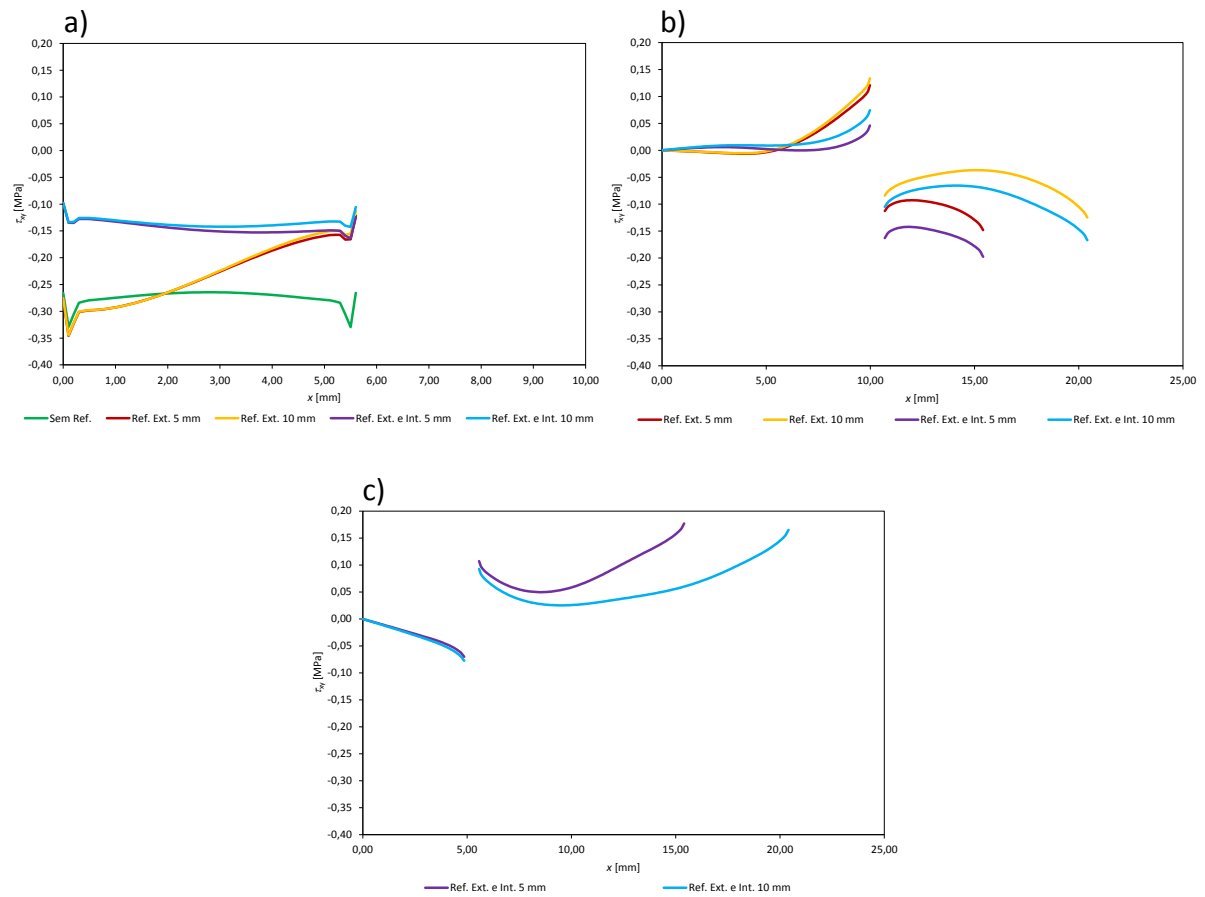


Figura 152 – Tensão de corte τ_{xy} , com $\alpha=30^\circ$ para as diferentes configurações de reparação da camada de adesivo do remendo (a), do reforço exterior (b) e do reforço interior (c).

Apêndice 5 Curvas $P-\delta$ Numéricas para Reparações com o Adesivo Araldite® 2015

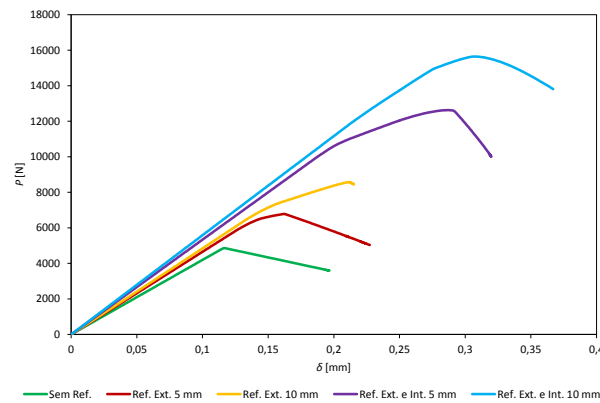


Figura 153 – Curva $P-\delta$ numérica para $\alpha=15^\circ$ e adesivo Araldite® 2015.

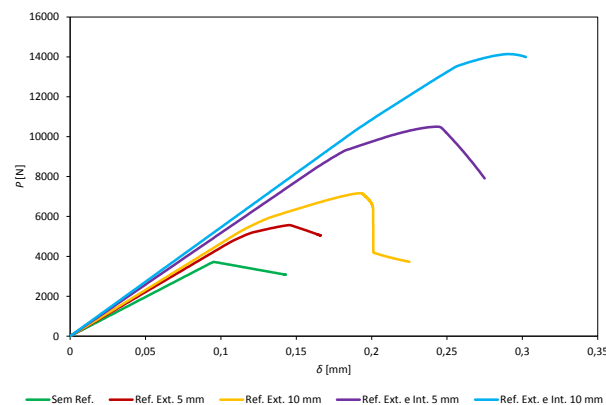


Figura 154 – Curva $P-\delta$ numérica para $\alpha=20^\circ$ e adesivo Araldite® 2015.

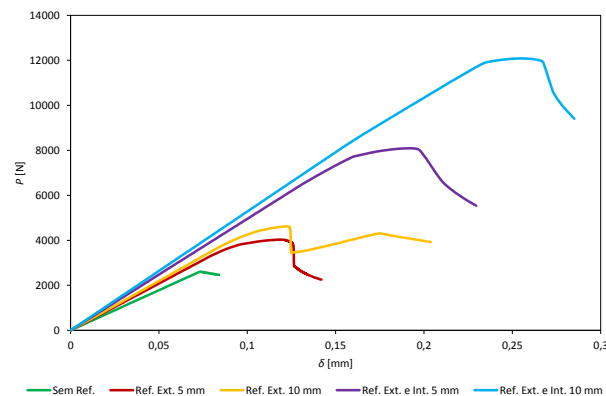


Figura 155 – Curva $P-\delta$ numérica para $\alpha=30^\circ$ e adesivo Araldite® 2015.

Apêndice 6 Curvas $P-\delta$ Numéricas para Reparações com o Adesivo Araldite® AV138

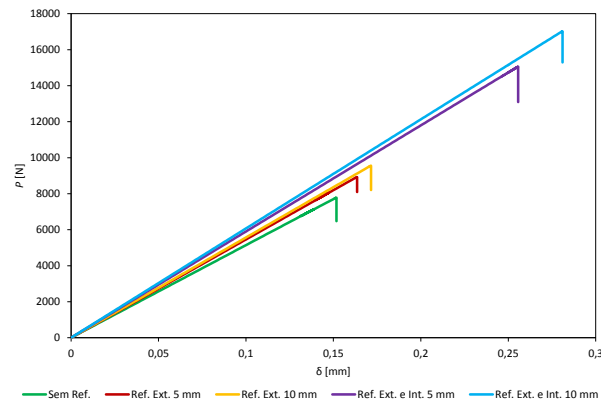


Figura 156 – Curva $P-\delta$ numérica para $\alpha=15^\circ$ e adesivo Araldite® AV138.

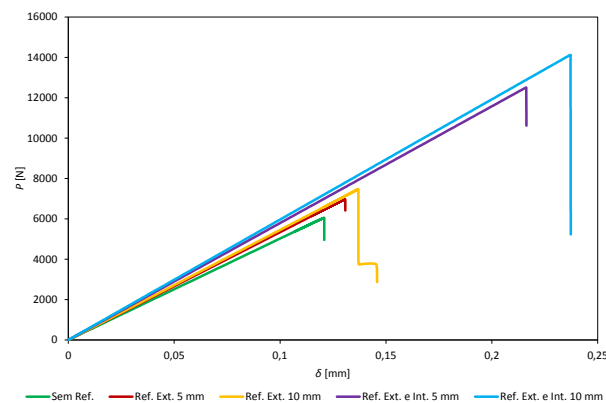


Figura 157 – Curva $P-\delta$ numérica para $\alpha=20^\circ$ e adesivo Araldite® AV138.

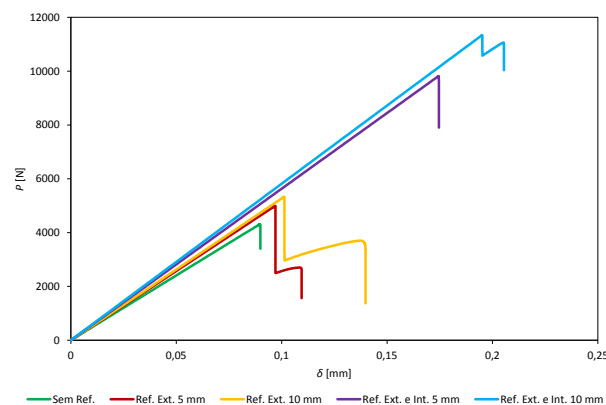


Figura 158 – Curva $P-\delta$ numérica para $\alpha=30^\circ$ e adesivo Araldite® AV138.

Apêndice 7 Comparação do Trabalho Numérico com o Experimental

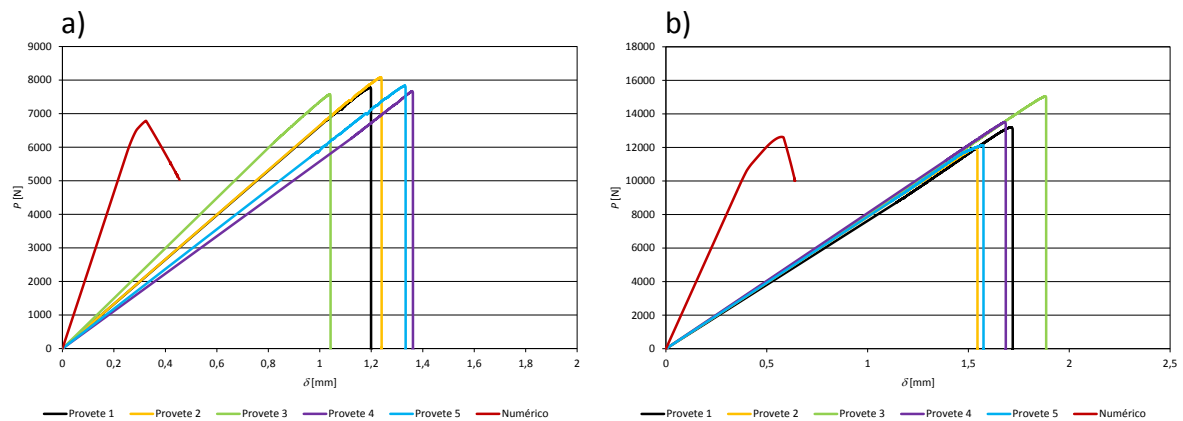


Figura 159 – Curvas P – δ experimentais e numéricas para $\alpha=15^\circ$, $c=5$ mm e reforço exterior (a) e com reforço exterior e interior (b).

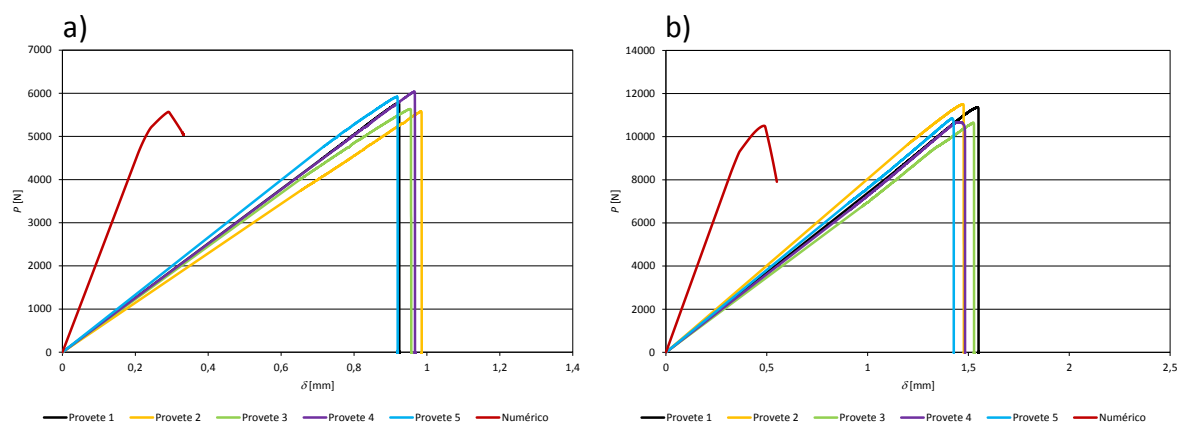


Figura 160 – Curvas P – δ experimentais e numéricas para $\alpha=20^\circ$, $c=5$ mm e reforço exterior (a) e com reforço exterior e interior (b).

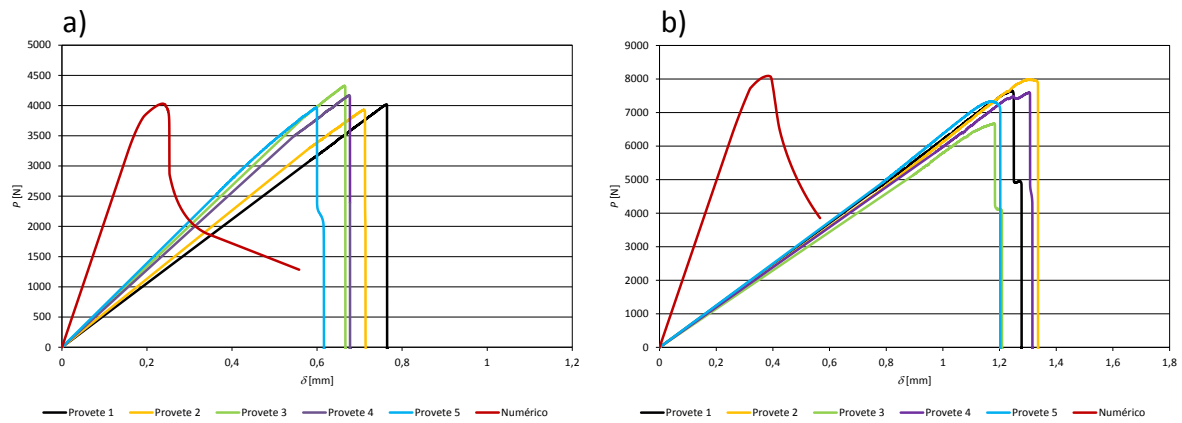


Figura 161 – Curvas P – δ experimentais e numéricas para $\alpha=30^\circ$, $c=5$ mm e reforço exterior (a) e com reforço exterior e interior (b).

Anexo A Ficha Técnica da Liga de Alumínio AW6082 T651

| | % Si | % Fe | % Cu | % Mn | % Mg | % Zn | % Ti | % Pb | % Cr | % | % Outros | % Al |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------|------|-----------|-----------|-----------------|----------|-------|
| 6005 A | 0.50-0.90 | 0.35 | 0.10 | 0.30 | 0.40-0.70 | 0.20 | 0.10 | - | 0.30 | 0.12-0.5Mn + Cr | 0.15 | RESTO |
| 6012 | 0.60-1.40 | 0.50 | 0.10 | 0.40-1.00 | 0.60-1.20 | 0.30 | 0.30 | 0.40-2.0 | 0.30 | Bi 0.7 | 0.15 | " |
| 6060 | 0.30-0.60 | 0.10-0.30 | 0.10 | 0.10 | 0.35-0.60 | 0.15 | 0.10 | - | 0.05 | - | 0.15 | " |
| 6061 | 0.40-0.80 | 0.70 | 0.15-0.40 | 0.15 | 0.80-1.20 | 0.25 | 0.15 | - | 0.04-0.35 | - | 0.15 | " |
| 6063 | 0.20-0.60 | 0.35 | 0.10 | 0.10 | 0.45-0.90 | 0.10 | 0.10 | - | 0.10 | - | 0.15 | " |
| 6082 | 0.70-1.30 | 0.50 | 0.10 | 0.40-1.00 | 0.60-1.20 | 0.20 | 0.10 | - | 0.25 | - | 0.10 | " |
| 6101 | 0.30-0.70 | 0.50 | 0.10 | 0.03 | 0.35-0.80 | 0.10 | - | - | - | - | 0.15 | " |
| 6106 | 0.30-0.60 | 0.35 | 0.25 | 0.05-0.20 | 0.40-0.80 | 0.20 | 0.10 | - | 0.20 | - | 0.15 | " |
| 6181 | 0.80-1.20 | 0.45 | 0.10 | 0.15 | 0.60-1.00 | 0.20 | - | - | 0.10 | - | 0.15 | " |
| 6262 | 0.40-0.80 | 0.70 | 0.15-0.40 | 0.15 | 0.80-1.20 | 0.25 | - | 0.40-0.70 | 0.04-0.14 | Bi 0.4-0.7 | 0.15 | " |
| 6351 | 0.70-1.30 | 0.50 | 0.10 | 0.40-0.80 | 0.40-0.80 | 0.20 | 0.20 | - | - | - | 0.15 | " |

Figura 162 – Composição química da série 6000 das ligas standard da Lanema.

| LANEMA | E.U. | ESPAÑA | FRANÇA | ALEMANHA | G.B. | SUÉCIA | SUIÇA | CANADA | ITÁLIA | C.E.I. | ÁUSTRIA |
|-----------------------------|-------------|---------------|----------|--------------------|--------|--------|-------------|---------|-------------|--------|-------------|
| | NORMAS E.N. | NORMAS U.N.E. | AFNOR | D.I.M. (1712-1725) | B.S. | S.I.S. | | C.S.A. | U.N.I. | GOST | ÖNORM |
| Alumínio Magnésio - Silício | | | | | | | | | | | |
| 6005 A | AW 6005A | L-3454 38.349 | A-SG0.5 | AlMgSi0.7 3.3210 | - | - | AlMgSi0.7 | - | - 9006/6 | - | - |
| 6060/3 | AW 6060/3 | L-3441 38.337 | A-GS | AlMgSi0.5 3.3206 | H 9 | 4104 | AlMgSi0.5 | 50 S | 3669 9006/1 | - | AlMgSi0.5 |
| 6061 | AW 6061 | L-3420 38.342 | A-SGUC | AlMg1SiCu 3.3211 | H 20 | - | - | 611 N | 6170 9006/2 | 1330 | - |
| 6081 | AW 6081 | L-3451 38.334 | A-SGMO.3 | AlMgSi1 3.2315 | - | - | AlMgSi1 | 61 S | - | - | AlMgSi0.8Mn |
| 6082 | AW 6082 | L-3453 38.348 | A-SGMO.7 | AlMgSi1 3.2315 | H 30 | 4212 | AlMgSi1Mn | SG 11 R | 3571 9006/4 | - | AlMgSi1 |
| 6101 | AW 6101 | L-3431 38.343 | A-GSL | EA1 MgSi 3.2307 | E 91 E | - | E AlMgSi0.4 | - | - | - | AlSi1Mg |
| 6261 | AW 6261 | L-3420 38.342 | - | - | - | 4102 | - | - | - | - | - |
| 6012 | AW 6012 | L-3452 38.344 | - | AlMgSiPb 3.0615 | - | - | - | - | - | 1350 | AWMgSiPbCd |
| 6262 | AW 6262 | - | - | - | - | - | - | - | 9006/7 | - | - |
| 6351 | AW 6351 | L-3451 38.334 | A-SGM | AlMgSi1 3.2318 | H 30 | - | - | - | - | - | - |

Figura 163 – Equivalências Internacionais da série 6000 das ligas de alumínio da Lanema.

| SÉRIE 6xxx | LIGAS | ESTADO | CARGA DE ROTURA Rm - N / mm² | LIMITE ELÁSTICO Rp 0,2 - N / mm² | ALARGAMENTO A 5,65 % | LIMITE DE FADIGA N / mm² | DUREZA BRINELL HB | DUREZA VICKERS HV | MÓDULO ELÁSTICO E / mm² | PESO ESPECÍFICO g / cm³ | INTERVALO DE FUSÃO °C | COEFICIENTE DE DILATAÇÃO LINEAR 1 / K | CALOR ESPECÍFICO J / Kg K | RESISTIVIDADE ELÉCTRICA 20 - µΩ . cm | CONDUTIVIDADE ELÉCTRICA % IACS |
|------------|--------|---------|---------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|---|------------------------------|--|--------------------------------------|
| | 6005 A | T1 | 200 | 100 | 25 | - | - | - | 69.500 | 2,71 | 605-655 | 23,3 | 892 | - | - |
| | 6005 A | T4 | 210 | 110 | 16 | - | - | - | 69.500 | 2,71 | 605-655 | 23,3 | 892 | - | - |
| | 6005 A | T5 | 270 | 240 | 13 | - | - | - | 69.500 | 2,71 | 605-655 | 23,3 | 892 | - | - |
| | 6005 A | T6 | 285 | 260 | 12 | 190 | 90 | 95 | 69.500 | 2,71 | 605-655 | 23,3 | 892 | 35,0 | 49,5 |
| | 6060 | O | 100 | 50 | 27 | 110 | 25 | 25 | 69.500 | 2,70 | 610-655 | 23,4 | 898 | - | - |
| | 6060 | T1 | 150 | 90 | 25 | - | 45 | 45 | 69.500 | 2,70 | 610-655 | 23,4 | 898 | 35,0 | 49,5 |
| | 6060 | T4 | 160 | 90 | 20 | - | 50 | 55 | 69.500 | 2,70 | 610-655 | 23,4 | 898 | 36,0 | 48,0 |
| | 6060 | T5 | 220 | 185 | 13 | 160 | 75 | 80 | 69.500 | 2,70 | 610-655 | 23,4 | 898 | 32,0 | 54,0 |
| | 6060 | T6 | 245 | 215 | 13 | 160 | 85 | 90 | 69.500 | 2,70 | 610-655 | 23,4 | 898 | 32,0 | 54,0 |
| | 6061 | O | 125 | 55 | 27 | 120 | 30 | 30 | 70.000 | 2,70 | 580-650 | 23,3 | 895 | 37,0 | 46,5 |
| | 6061 | T4 | 235 | 140 | 21 | 180 | 65 | 70 | 70.000 | 2,70 | 580-650 | 23,3 | 895 | 43,0 | 40,0 |
| | 6061 | T6/T651 | 310 | 270 | 14 | 190 | 95 | 100 | 70.000 | 2,70 | 580-650 | 23,3 | 895 | 40,0 | 43,0 |
| | 6063 | O | 100 | 50 | 27 | 110 | 25 | 25 | 69.500 | 2,70 | 615-655 | 23,5 | 898 | 30,0 | 57,5 |
| | 6063 | T1 | 150 | 90 | 26 | 150 | 45 | 45 | 69.500 | 2,70 | 615-655 | 23,5 | 898 | 34,0 | 50,5 |
| | 6063 | T4 | 160 | 90 | 21 | 150 | 50 | 50 | 69.500 | 2,70 | 615-655 | 23,5 | 898 | 35,0 | 49,5 |
| | 6063 | T5 | 215 | 175 | 14 | 150 | 60 | 65 | 69.500 | 2,70 | 615-655 | 23,5 | 898 | 31,0 | 55,5 |
| | 6063 | T6 | 245 | 210 | 14 | 150 | 75 | 80 | 69.500 | 2,70 | 615-655 | 23,5 | 898 | 33,0 | 52,0 |
| | 6063 | T8 | 260 | 240 | - | - | 80 | 85 | 69.500 | 2,70 | 615-655 | 23,5 | 898 | 33,0 | 52,0 |
| | 6082 | O | 130 | 60 | 27 | 120 | 35 | 35 | 70.000 | 2,71 | 575-650 | 23,1 | 894 | 31,0 | 55,5 |
| | 6082 | T1 | 260 | 170 | 24 | 200 | 70 | 75 | 70.000 | 2,71 | 575-650 | 23,1 | 894 | - | - |
| | 6082 | T4 | 260 | 170 | 19 | 200 | 70 | 75 | 70.000 | 2,71 | 575-650 | 23,1 | 894 | 41,0 | 42,0 |
| | 6082 | T5 | 325 | 275 | 11 | 210 | 90 | 95 | 70.000 | 2,71 | 575-650 | 23,1 | 894 | - | - |
| | 6082 | T6/T651 | 340 | 310 | 11 | 210 | 95 | 100 | 70.000 | 2,71 | 575-650 | 23,1 | 894 | 39,0 | 44,0 |

Figura 164 – Propriedades mecânicas típicas da série 6000 das ligas de alumínio da Lanema.

Anexo B Ficha Técnica do Adesivo Araldite® 2015



Advanced Materials

Araldite® 2015

Structural Adhesives

TECHNICAL DATA SHEET

Araldite® 2015

Two component epoxy paste adhesive

Key properties

- Toughened paste
- Ideal for bonding GRP, SMC and dissimilar substrates
- Low shrinkage
- Gap filling, non sagging up to 10mm thickness
- High shear and peel strength

Description

Araldite 2015 is a two component, room temperature curing paste adhesive giving a resilient bond. It is thixotropic and non sagging up to 10mm thickness. It is particularly suitable for SMC and GRP bonding.

Product data

| Property | 2015 A | 2015 B | Mixed Adhesive |
|---------------------------|---------------|---------------|-----------------|
| Colour (visual) | neutral paste | neutral paste | neutral paste |
| Specific gravity | 1.4 | 1.4 | 1.4 |
| Viscosity at 25°C (Pas) | thixotropic | thixotropic | thixotropic |
| Pot Life (100 gm at 25°C) | - | - | 30 - 40 minutes |

Processing

Pretreatment

The strength and durability of a bonded joint are dependent on proper treatment of the surfaces to be bonded. At the very least, joint surfaces should be cleaned with a good degreasing agent such as acetone, iso-propanol (for plastics) or other proprietary degreasing agents in order to remove all traces of oil, grease and dirt. Low grade alcohol, gasoline (petrol) or paint thinners should never be used. The strongest and most durable joints are obtained by either mechanically abrading or chemically etching ("pickling") the degreased surfaces. Abrading should be followed by a second degreasing treatment.

| Mix ratio | Parts by weight | Parts by volume |
|-----------------|-----------------|-----------------|
| Araldite 2015/A | 100 | 100 |
| Araldite 2015/B | 100 | 100 |

Araldite 2015 is available in cartridges incorporating mixers and can be applied as ready to use adhesive with the aid of the tool recommended by Huntsman Advanced Materials.



Application of adhesive

The resin/hardener mix may be applied manually or robotically to the pretreated and dry joint surfaces. Huntsman's technical support group can assist the user in the selection of an suitable application method as well as suggest a variety of reputable companies that manufacture and service adhesive dispensing equipment.

A layer of adhesive 0.05 to 0.10 mm thick will normally impart the greatest lap shear strength to the joint. Huntsman stresses that proper adhesive joint design is also critical for a durable bond. The joint components should be assembled and secured in a fixed position as soon as the adhesive has been applied.

For more detailed explanations regarding surface preparation and pretreatment, adhesive joint design, and the dual syringe dispensing system, visit www.araldite2000plus.com.

Equipment maintenance

All tools should be cleaned with hot water and soap before adhesives residues have had time to cure. The removal of cured residues is a difficult and time-consuming operation.

If solvents such as acetone are used for cleaning, operatives should take the appropriate precautions and, in addition, avoid skin and eye contact.

Times to minimum shear strength

| Temperature | °C | 10 | 15 | 23 | 40 | 60 | 100 |
|--------------------|---------|----|-----|----|----|----|-----|
| Cure time to reach | hours | 12 | 7.5 | 4 | 1 | - | - |
| LSS > 1MPa | minutes | - | - | - | - | 17 | 6 |
| Cure time to reach | hours | 21 | 13 | 6 | 2 | - | - |
| LSS > 10MPa | minutes | - | - | - | - | 35 | 7 |

LSS = Lap shear strength.

Typical cured properties

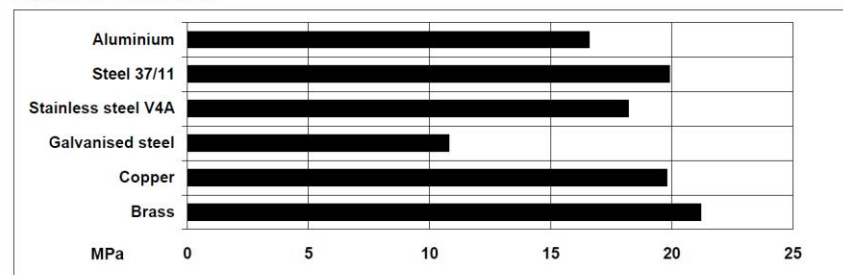
Unless otherwise stated, the figures given below were all determined by testing standard specimens made by lap-jointing 114 x 25 x 1.6 mm strips of aluminium alloy. The joint area was 12.5 x 25 mm in each case.

The figures were determined with typical production batches using standard testing methods. They are provided solely as technical information and do not constitute a product specification.

Average lap shear strengths of typical metal-to-metal joints (ISO 4587)

Cured for 16 hours at 40°C and tested at 23°C

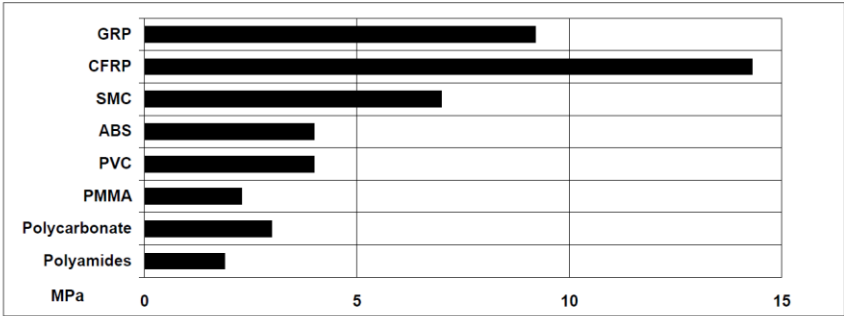
Pretreatment - Sand blasting





Average lap shear strengths of typical plastic-to-plastic joints (ISO 4587)

Cured for 16 hours at 40°C and tested at 23°C. Pretreatment – Lightly abrade and alcohol degrease.



Tensile strength at 23°C (ISO 527)

30 MPa

Tensile modulus

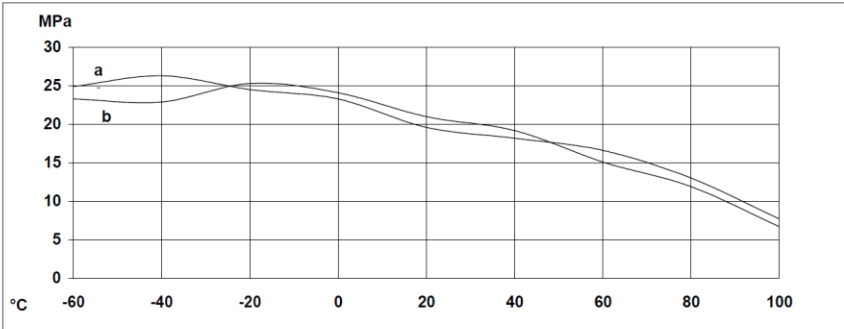
2 GPa

Elongation at break

4.4 %

Lap shear strength versus temperature (ISO 4587) (typical average values)

Cure: (a) = 7 days at 23°C; (b) = 24 hours at 23°C + 30 minutes at 80°C



Roller peel test (ISO 4578)

Cured: 16 hours at 40°C

4 N/mm

Glass transition temperature

Cure: 16 hours at 40°C

67°C by DSC

Cure: 1 hour at 80°C

87 by shear modulus

DIN 53445

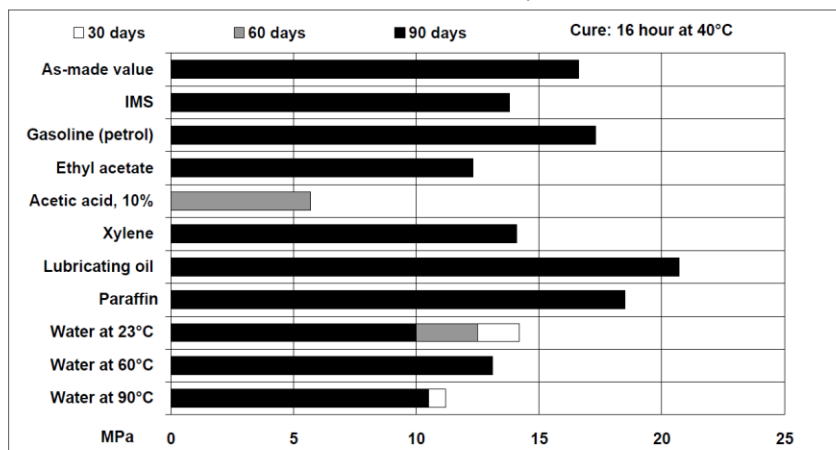
Dielectric constant (500v at 25°C)

5.6 at 1 kHz



Lap shear strength versus immersion in various media (typical average values)

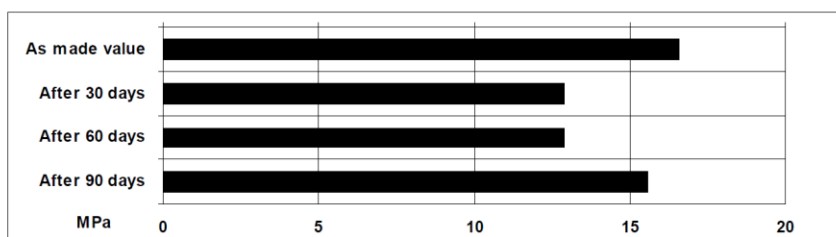
Unless otherwise stated, L.S.S. was determined after immersion for 90 days at 23°C



Lap shear strength versus tropical weathering

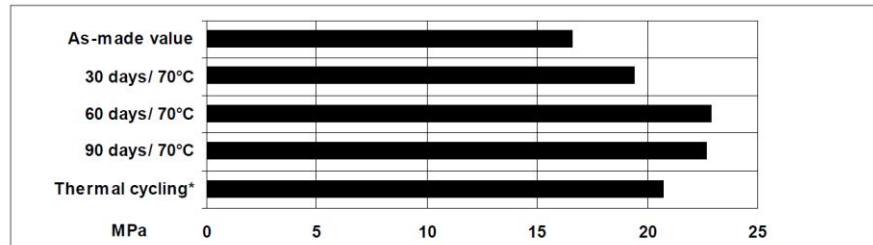
(40/92, DIN 50015; typical average values)

Cure: 16 hours at 40°C Test: at 23°C



**Lap shear strength versus heat ageing**

Cure: 16 hours at 40°C



*25 cycles -30°C to + 70°C

Shear modulus (DIN 53445)

Cure: 1 hour at 80°C

| Temperature | G' | Δ |
|-------------|---------|------|
| 0°C | 1.0 Gpa | 0.25 |
| 25°C | 0.9 Gpa | 0.25 |
| 50°C | 0.8 Gpa | 0.35 |
| 75°C | 0.2 Gpa | 1.9 |
| 100°C | 2 MPa | 0.5 |

Flexural Properties (ISO 178) Cure 16 hours/ 40°C

tested at 23°C

Flexural Strength

42.7 MPa

Flexural Modulus

1813.6 MPa

Resistance to fatigue (40 Hz at 23°C) (quoted as cycles to failure)

| Maximum applied load | Sandblasted aluminium | Chromate pickled aluminium |
|----------------------------|-----------------------|----------------------------|
| 20% of static failing load | $>10^7$ | $>10^7$ |
| 25% of static failing load | $>10^7$ | 10^7 |
| 30% of static failing load | 3×10^6 | 8×10^5 |

(Static failing load 16 MPa)



Storage

Araldite 2015/A and Araldite 2015/B may be stored for up to 3 years at room temperature provided the components are stored in sealed containers. The expiry date is indicated on the label.

Handling precautions

Caution

Our products are generally quite harmless to handle provided that certain precautions normally taken when handling chemicals are observed. The uncured materials must not, for instance, be allowed to come into contact with foodstuffs or food utensils, and measures should be taken to prevent the uncured materials from coming in contact with the skin, since people with particularly sensitive skin may be affected. The wearing of impervious rubber or plastic gloves will normally be necessary; likewise the use of eye protection. The skin should be thoroughly cleansed at the end of each working period by washing with soap and warm water. The use of solvents is to be avoided. Disposable paper - not cloth towels - should be used to dry the skin. Adequate ventilation of the working area is recommended. These precautions are described in greater detail in the Material Safety Data sheets for the individual products and should be referred to for fuller information.

Huntsman Advanced Materials

All recommendations for the use of our products, whether given by us in writing, verbally, or to be implied from the results of tests carried out by us, are based on the current state of our knowledge. Notwithstanding any such recommendations the Buyer shall remain responsible for satisfying himself that the products as supplied by us are suitable for his intended process or purpose. Since we cannot control the application, use or processing of the products, we cannot accept responsibility therefor. The Buyer shall ensure that the intended use of the products will not infringe any third party's intellectual property rights. We warrant that our products are free from defects in accordance with and subject to our general conditions of supply.



Huntsman Advanced Materials
(Switzerland) GmbH
Klybeckstrasse 200
4057 Basel
Switzerland

Tel: +41 (0)61 966 33 33
Fax: +41 (0)61 966 35 19
www.huntsman.com/advanced_materials

Huntsman Advanced Materials warrants only that its products meet the specifications agreed with the buyer. Typical properties, where stated, are to be considered as representative of current production and should not be treated as specifications.

The manufacture of materials is the subject of granted patents and patent applications; freedom to operate patented processes is not implied by this publication.

While all the information and recommendations in this publication are, to the best of our knowledge, information and belief, accurate at the date of publication, NOTHING HEREIN IS TO BE CONSTRUED AS A WARRANTY, EXPRESS OR OTHERWISE.

IN ALL CASES, IT IS THE RESPONSIBILITY OF THE USER TO DETERMINE THE APPLICABILITY OF SUCH INFORMATION AND RECOMMENDATIONS AND THE SUITABILITY OF ANY PRODUCT FOR ITS OWN PARTICULAR PURPOSE.

The behaviour of the products referred to in this publication in manufacturing processes and their suitability in any given end-use environment are dependent upon various conditions such as chemical compatibility, temperature, and other variables, which are not known to Huntsman Advanced Materials. It is the responsibility of the user to evaluate the manufacturing circumstances and the final product under actual end-use requirements and to adequately advise and warn purchasers and users thereof.

Products may be toxic and require special precautions in handling. The user should obtain Safety Data Sheets from Huntsman Advanced Materials containing detailed information on toxicity, together with proper shipping, handling and storage procedures, and should comply with all applicable safety and environmental standards.

Hazards, toxicity and behaviour of the products may differ when used with other materials and are dependent on manufacturing circumstances or other processes. Such hazards, toxicity and behaviour should be determined by the user and made known to handlers, processors and end users.

Except where explicitly agreed otherwise, the sale of products referred to in this publication is subject to the general terms and conditions of sale of Huntsman Advanced Materials LLC or of its affiliated companies including without limitation, Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA, Huntsman Advanced Materials Americas Inc., and Huntsman Advanced Materials (Hong Kong) Ltd.

Huntsman Advanced Materials is an international business unit of Huntsman Corporation. Huntsman Advanced Materials trades through Huntsman affiliated companies in different countries including but not limited to Huntsman Advanced Materials LLC in the USA and Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA in Europe.

[Araldite® 2015] is a registered trademark of Huntsman Corporation or an affiliate thereof.

Copyright © 2007 Huntsman Corporation or an affiliate thereof. All rights reserved.

Anexo C Ficha Técnica do Adesivo Araldite® AV138



Advanced Materials

Araldite® AV 138M-1 / Hardener HV 998

Structural Adhesives

Araldite® AV 138M-1 / Hardener HV 998

Two component epoxy adhesive

Key properties

- Low out gassing / volatile loss
- Excellent chemical resistance
- Temperature resistant to 120°C
- Thixotropic, gap filling paste

Description

Araldite® AV 138M-1 / Hardener HV 998 is a two component, room temperature curing paste adhesive of high strength. When fully cured the adhesive will have excellent performance at elevated temperatures and has high chemical resistance. It is suitable for bonding a wide variety of metals, ceramics, glass, rubbers, rigid plastics and other materials, and is widely used in many industrial applications where resistance to aggressive or warm environments are required. The low out gassing makes this product suitable for specialist electronic telecommunication and aerospace applications.

Typical product data

| Property | Araldite® AV 138M-1 | Hardener HV 998 | Mix |
|---------------------------|---------------------|-----------------|-------------|
| Colour (visual) | beige | grey | grey |
| Specific gravity | ca. 1.7 | ca. 1.7 | ca. 1.7 |
| Viscosity (Pas) | thixotropic | thixotropic | thixotropic |
| Pot Life (100 gm at 25°C) | - | - | 35 mins |

Processing

Pretreatment

The strength and durability of a bonded joint are dependant on proper treatment of the surfaces to be bonded. At the very least, joint surfaces should be cleaned with a good degreasing agent such as acetone or other proprietary degreasing agents in order to remove all traces of oil, grease and dirt. Low grade alcohol, gasoline (petrol) or paint thinners should never be used. The strongest and most durable joints are obtained by either mechanically abrading or chemically etching ("pickling") the degreased surfaces. Abrading should be followed by a second degreasing treatment

| Mix ratio | Parts by weight | Parts by volume |
|---------------------|-----------------|-----------------|
| Araldite® AV 138M-1 | 100 | 100 |
| Hardener HV 998 | 40 | 40 |

Resin and hardener should be blended until they form a homogeneous mix.

Application of adhesive

The resin/hardener mix is applied with a spatula, to the pretreated and dry joint surfaces. A layer of adhesive 0.05 to 0.10 mm thick will normally impart the greatest lap shear strength to the joint. The joint components should be assembled and clamped as soon as the adhesive has been applied. An even con-



tact pressure throughout the joint area will ensure optimum cure.

Mechanical processing

Specialist firms have developed metering, mixing and spreading equipment that enables the bulk processing of adhesive. We will be pleased to advise customers on the choice of equipment for their particular needs.

Equipment maintenance

All tools should be cleaned with hot water and soap before adhesives residues have had time to cure. The removal of cured residues is a difficult and time-consuming operation.

If solvents such as acetone are used for cleaning, operatives should take the appropriate precautions and, in addition, avoid skin and eye contact.

Curing times

| Temperature | °C | 10 | 15 | 23 | 40 | 60 | 80 | 100 |
|-------------|-------------------|----|----|----|----|----|----|-----|
| Cure time | hours | 48 | 36 | 24 | 16 | 1 | - | - |
| | minutes | - | - | - | - | - | 15 | 10 |
| LSS at 23°C | N/mm ² | 10 | 11 | 13 | 14 | 15 | 16 | 18 |

LSS = Lap shear strength.

Typical cured properties

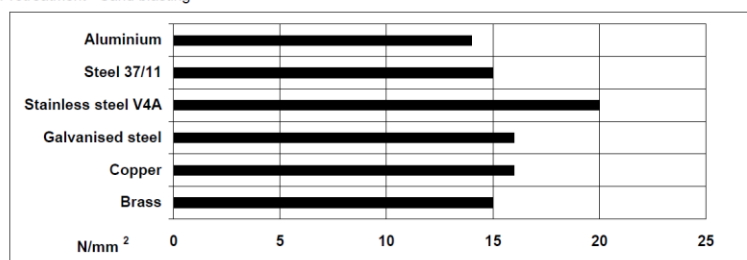
Unless otherwise stated, the figures given below were all determined by testing standard specimens made by lap-jointing 114 x 25 x 1.6 mm strips of aluminium alloy. The joint area was 12.5 x 25 mm in each case.

The figures were determined with typical production batches using standard testing methods. They are provided solely as technical information and do not constitute a product specification.

Average lap shear strengths of typical metal-to-metal joints (ISO 4587)

Cure: 16 hours at 40°C and tested at 23°C

Pretreatment - Sand blasting



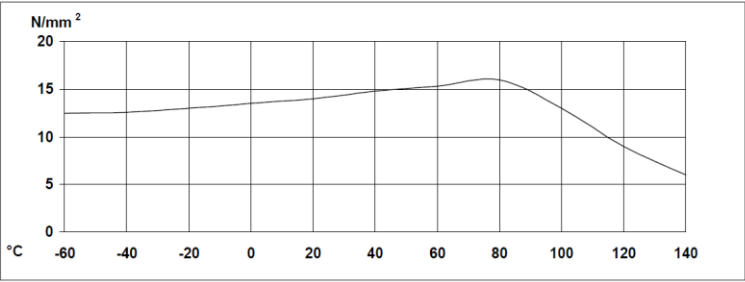
Shear modulus (DMA ISO 6721)

Cure: 16 hours at 40°C

| | |
|-------|----------|
| -25°C | 2175 MPa |
| 0°C | 2030 MPa |
| 20°C | 1890 MPa |
| 60°C | 780 MPa |
| 100°C | 34 MPa |
| 120°C | 27 MPa |



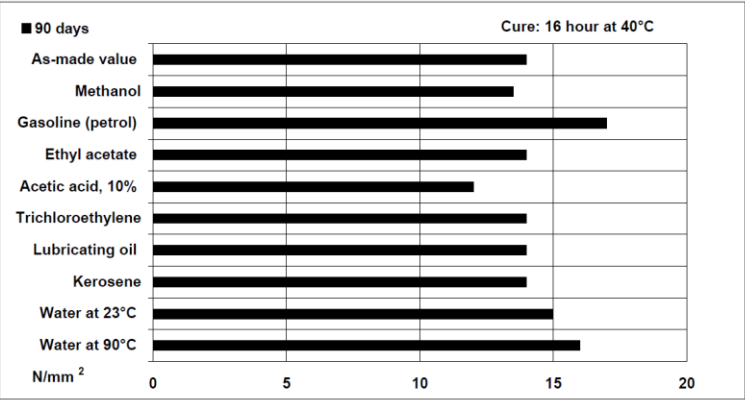
Lap shear strength versus temperature (ISO 4587) (typical average values)
Cure: 16 hours at 40°C



Roller peel test (ISO 4578)

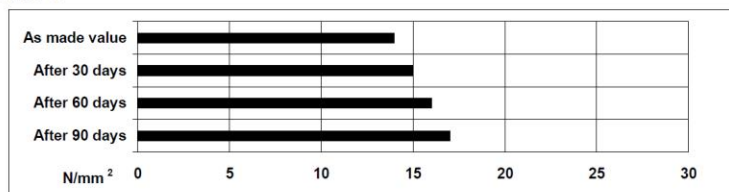
| | |
|------------------------|----------|
| Cure: 16 hours at 40°C | 1.8 N/mm |
| Shore hardness | D84-86 |
| Tensile strength | |
| Cure: 16 hours at 40°C | 43 MPa |
| Tensile modulus | 4.7 GPa |
| Elongation at break | 1.2% |

Lap shear strength versus immersion in various media (typical average values)
Unless otherwise stated, L.S.S. was determined after immersion for 90 days at 23°C





Lap shear strength versus tropical weathering
(40/92, DIN 50015; typical average values)
Test at 23°C



Storage

Araldite® AV 138M-1 and Hardener HV 998 may be stored for up to 6 years and 3 years respectively at room temperature provided that the components are stored in sealed containers. The expiry date is indicated on the label.

Handling Precautions

Caution

Our products are generally quite harmless to handle provided that certain precautions normally taken when handling chemicals are observed. The uncured materials must not, for instance, be allowed to come into contact with food-stuffs or food utensils, and measures should be taken to prevent the uncured materials from coming in contact with the skin, since people with particularly sensitive skin may be affected. The wearing of impervious rubber or plastic gloves will normally be necessary; likewise the use of eye protection. The skin should be thoroughly cleansed at the end of each working period by washing with soap and warm water. The use of solvents is to be avoided. Disposable paper - not cloth towels - should be used to dry the skin. Adequate ventilation of the working area is recommended. These precautions are described in greater detail in the Material Safety Data sheets for the individual products and should be referred to for fuller information.

Huntsman Advanced Materials
(Switzerland) GmbH
Klybeckstrasse 200
4057 Basel
Switzerland

Tel: +41 (0)61 299 11 11
Fax: +41 (0)61 299 11 12

www.huntsman.com/advanced_materials
Email: advanced_materials@huntsman.com

Huntsman Advanced Materials warrants only that its products meet the specifications agreed with the buyer. Typical properties, where stated, are to be considered as representative of current production and should not be treated as specifications.

The manufacture of materials is the subject of granted patents and patent applications; freedom to operate patented processes is not implied by this publication.

While all the information and recommendations in this publication are, to the best of our knowledge, information and belief, accurate at the date of publication, NOTHING HEREIN IS TO BE CONSTRUED AS A WARRANTY, EXPRESS OR OTHERWISE. IN ALL CASES, IT IS THE RESPONSIBILITY OF THE USER TO DETERMINE THE APPLICABILITY OF SUCH INFORMATION AND RECOMMENDATIONS AND THE SUITABILITY OF ANY PRODUCT FOR ITS OWN PARTICULAR PURPOSE.

The behaviour of the products referred to in this publication in manufacturing processes and their suitability in any given end-use environment are dependent upon various conditions such as chemical compatibility, temperature, and other variables, which are not known to Huntsman Advanced Materials. It is the responsibility of the user to evaluate the manufacturing circumstances and the final product under actual end-use requirements and to adequately advise and warn purchasers and users thereof.

Products may be toxic and require special precautions in handling. The user should obtain Safety Data Sheets from Huntsman Advanced Materials containing detailed information on toxicity, together with proper shipping, handling and storage procedures, and should comply with all applicable safety and environmental standards.

Hazards, toxicity and behaviour of the products may differ when used with other materials and are dependent on manufacturing circumstances or other processes. Such hazards, toxicity and behaviour should be determined by the user and made known to handlers, processors and end users.

Except where explicitly agreed otherwise, the sale of products referred to in this publication is subject to the general terms and conditions of sale of Huntsman Advanced Materials LLC or of its affiliated companies including without limitation, Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA, Huntsman Advanced Materials Americas Inc., and Huntsman Advanced Materials (Hong Kong) Ltd.

Huntsman Advanced Materials is an international business unit of Huntsman Corporation. Huntsman Advanced Materials trades through Huntsman affiliated companies in different countries including but not limited to Huntsman Advanced Materials LLC in the USA and Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA in Europe.

Araldite is a registered trademark of Huntsman Corporation or an affiliate thereof.

Copyright © 2008 Huntsman Corporation or an affiliate thereof. All rights reserved.